

MIHAEL MACHADO DE SOUZA

**CARACTERIZAÇÃO DO TRANSPORTE SEDIMENTAR NA
DESEMBOCADURA SUL DO COMPLEXO ESTUARINO DE PARANAGUÁ**

**PONTAL DO PARANÁ
OUTUBRO DE 2012**

MIHAEL MACHADO DE SOUZA

**CARACTERIZAÇÃO DO TRANSPORTE SEDIMENTAR NA
DESEMBOCADURA SUL DO COMPLEXO ESTUARINO DE PARANAGUÁ**

Monografia apresentada como Trabalho de Conclusão
do Curso de Oceanografia, Universidade Federal do
Paraná, 2º semestre de 2012.

Orientador: Dr. Marcelo Renato Lamour

**PONTAL DO PARANÁ
OUTUBRO DE 2012**

CATALOGAÇÃO NA FONTE:
UFPR / SIBI - Biblioteca do Centro de Estudos do Mar

S729c Souza, Mihael Machado de
Caracterização do transporte sedimentar na desembocadura sul do Complexo Estuarino de Paranaguá. / Mihael Machado de Souza. – Pontal do Paraná, 2012. 65 f.; 29 cm.

Orientador: Dr. Marcelo Renato Lamour.

Monografia (graduação) - Curso de Oceanografia, Centro de Estudos do Mar, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

1. Corrente de maré. 2. Carga de fundo. 3. Suspensão. I. Título. II. Marcelo Renato Lamour. III. Universidade Federal do Paraná.

CDD 551.4701

TERMO DE APROVAÇÃO

Mihael Machado de Souza

“Caracterização do Transporte Sedimentar na Desembocadura Sul do Complexo Estuarino de Paranaguá”

Monografia aprovada como requisito parcial para a obtenção do grau de
Bacharel em Oceanografia, da Universidade Federal do Paraná, pela
Comissão formada pelos professores:


Prof.Dr.Maurício de Almeida Noernberg-CEM/UFPR


Prof.Dr.Maurício de Garcia Camargo-CEM/UFPR


Dr.José Eduardo Gonçalves-Instituto Tecnológico SIMEPAR


Prof.Dr.Marcelo Renato Lamour-CEM/UFPR
Presidente

Pontal do Paraná, 19 de novembro de 2012.

*Aquele que fala para um ouvido surdo,
é mudo.*

- Stephen King

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo, gostaria de agradecer aos meus pais e meu irmão, que me apoiaram e incentivaram durante esses cinco anos de graduação. Sem vocês nada disso seria possível.

Ao meu orientador, Dr. Marcelo Lamour, que embarcou na minha ideia maluca de trabalhar com armadilhas de sedimentos e dinâmica sedimentar na desembocadura do estuário, e me deu todo o suporte para desenvolver este trabalho, fica um agradecimento especial.

Agradeço a todos os professores que contribuíram durante minha formação e compartilharam comigo o conhecimento necessário para seguir na profissão. Em especial, ao Dr. Maurício Noernberg pelas inúmeras ajudas com os dados de correntes e com as dúvidas quanto à hidrodinâmica da região, e ao Dr. Maurício Camargo, pela ajuda com a estatística e com todas as dúvidas sobre temas diversos que surgiram ao longo do caminho.

Aos amigos de laboratório, LOGeo, agradeço pelas conversas, discussões, campos e cafés que tomamos todos os dias. Principalmente aqueles que embarcaram na ideia de campos de 13 horas comigo, parados num barquinho. Sei que não foi fácil nem divertido, mas o resultado valeu a pena.

Aos amigos e ao pessoal do GRR2008, um muito obrigado por todas as festas, churrascos e discussões. Com certeza não teria sido tão divertido sem vocês.

E a Ana, por tudo que você fez por mim nestes últimos 5 anos. Te amo.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xiii
PREFÁCIO	xiii

CAPÍTULO I – A CARGA DE FUNDO ATRAVÉS DE EQUAÇÕES DETERMINÍSTICAS NA DESEMBOLADURA SUL DO COMPLEXO ESTUARINO DE PARANAGUÁ..... 1

<i>Resumo</i>	1
<i>Abstract</i>	2
1. <i>Introdução</i>	3
1.1 Área de Estudo.....	5
2. <i>Metodologia</i>	6
2.1 Série de Dados.....	6
2.2 Dados de Campo.....	7
2.3 Definição da Melhor Equação	8
2.4 Estimativa do Transporte por Carga de Fundo	8
3. <i>Teoria</i>	9
4. <i>Resultados</i>	10
4.1 Séries de Dados e Dados de Campo.....	10
4.2 Definição da Melhor Equação	14
4.3 Estimativa do Transporte por Carga de Fundo	15
5. <i>Discussão</i>	17
5.1 Dados Pretéritos e de Campo.....	17
5.2 Definição da Melhor Equação.....	18
5.3 Estimativa do Transporte por Carga de Fundo	19
6. <i>Conclusão</i>	22
Referências	23

**CAPÍTULO II – O TRANSPORTE DE AREIAS EM SUSPENSÃO NA
DESEMBOCADURA SUL DO COMPLEXO ESTUARINO DE PARANAGUÁ: UMA
ABORDAGEM ATRAVÉS DE EQUAÇÕES PREDITIVAS E DADOS DE CAMPO 27**

<i>Resumo</i>	27
<i>Abstract</i>	28
1. <i>Introdução</i>	29
1.1 Área de estudo	30
2. <i>Materiais e Métodos</i>	32
2.1 Séries de Dados	32
2.2 Dados de Campo.....	33
2.3 Definição do Melhor Formato do Perfil de Concentrações, da C_a e da z_a	34
2.4 Volume Transportado por Ciclo de Maré	35
3. <i>Teoria</i>	36
4. <i>Resultados</i>	38
4.1 Série de Dados.....	38
4.2 Definição do Melhor Formato do Perfil de Concentrações, da C_a e da z_a	39
4.3 Volume Transportado por Ciclo de Maré	42
5. <i>Discussão</i>	44
5.1 Definição do Melhor Formato do Perfil de Concentrações, da C_a e da z_a	44
5.2 Volume Transportado por Ciclo de Maré	47
6. <i>Conclusão</i>	49
Referências	49

CONSIDERAÇÕES FINAIS 52

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Visão geral da desembocadura do Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP), com o detalhe da batimetria no transecto estudado no qual foram obtidas as amostras de transporte por carga de fundo e os dados de correntes.

Figura 1.2 – Curvas das marés de 2008 e 2012, mostrando uma variação efetiva na amplitude de 0,2 m (acima). Abaixo, gráfico com a velocidade do fluxo ao longo do ciclo de maré (em m.s^{-1}), com a faixa de transporte nulo.

Figura 1.3 – Distribuição do tamanho do grão dos sedimentos coletados pela armadilha nas três estações.

Figura 1.4 – Porcentagem de arredondamento dos sedimentos capturados pela armadilha em cada uma das estações amostrais.

Figura 1.5 – Regressão tipo II entre as formulações teóricas (eixo x) e os dados medidos *in situ* (eixo y). Em destaque, o índice de determinação (R^2) e a correlação entre as retas da regressão (linha pontilhada) e a reta ideal (linha sólida).

Figura 1.6 – Razão entre taxas previstas e mensuradas em relação à velocidade das correntes. Linha pontilhada marca o intervalo de um fator 0,5 a 3, com a porcentagem dos dados dentro deste intervalo incluída.

Figura 1.7 – Quantidade de sedimentos transportados ($\text{kg.m}^{-1}.\text{Ciclo de Maré}^{-1}$) a partir da equação de Meyer-Peter & Müller (1948) e Van Rijn (2007) para a seção de estudo.

Figura 1.8 – Possíveis origens dos sedimentos sendo exportados pela

desembocadura sul do CEP (I a III) (Adaptado de Lamour *et al.*, 2004).

Figura 2.1 – Visão geral da desembocadura do Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP), com o detalhe da batimetria no transecto estudado no qual foram obtidas as amostras de transporte por carga de fundo e os dados de correntes.

Figura 2.2 – Curva de calibração da turbidez (em NTU) a partir da concentração de sólidos em suspensão (kg.m^{-3}).

Figura 2.3 – Curvas das marés de 2008 e 2012, mostrando uma variação efetiva na amplitude de 0,2 m (acima). Abaixo, gráfico com a velocidade do fluxo ao longo do ciclo de maré (em m.s^{-1}), com a faixa de transporte nulo.

Figura 2.4 – Perfil vertical de concentrações (em mg.l^{-1}) ao longo do ciclo de maré interpolados a partir dos perfis verticais com o CTD, utilizando a profundidade adimensional para a comparação das estações.

Figura 2.5 – Razão entre taxas preditas e mensuradas usando os diferentes perfis de concentração avaliados, utilizando como base o cálculo da concentração e profundidade de referência segundo Van Rijn (1984).

Figura 2.6 – Razões entre as taxas preditas e mensuradas utilizando as diferentes fórmulas de concentração e profundidade de referência. Perfil de concentrações na coluna d'água utilizado foi o de Van Rijn (1984).

Figura 2.7 – Razões entre as taxas preditas e mensuradas utilizando as fórmulas de Van Rijn (1984) e Van Rijn (1984) Modificado, para as concentrações e profundidade de referência.

Figura 2.8 – Quantidade de sedimentos transportados ($\text{kg.Ciclo de Maré}^{-1}$)

calculada a partir do perfil de Van Rijn de concentrações para a coluna d'água, e da concentração e profundidade de referência sugeridas pelo mesmo autor com a modificação sugerida neste trabalho.

Figura 2.9 – Quantidade de sedimentos transportados ($\text{kg.Ciclo de Maré}^{-1}$) a partir do valor médio do transporte na coluna d'água obtido a partir dos perfis com CTD.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Resumo das taxas obtidas (em $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$) com o amostrador físico e das preditas a partir das velocidades de fluxo pelas equações. As amostras com (*) foram removidas das análises estatísticas por serem consideradas outliers.

PREFÁCIO

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar a desembocadura sul do Complexo Estuarino de Paranaguá quanto a seu comportamento sedimentar, analisando o transporte de sedimentos na região. A abordagem utilizada foi a de estimar taxas de transporte de sedimentos, de forma a elucidar a escala provável em que estes processos ocorrem na região.

O trabalho foi dividido em dois capítulos, de forma a abordar os processos de transporte por carga de fundo e em suspensão independentemente, e cada capítulo corresponde a um artigo proposto para publicação. Por esta razão, cada um deles apresenta uma estrutura fixa, e pode ser lido de forma independente. Dessa forma, alguns pontos em ambos os textos se sobrepõem, o que se estende a algumas figuras, ao passo que ambos tratam da mesma área de estudo e necessitam da mesma avaliação do uso de dados pretéritos.

Para a publicação, e consequente estruturação do documento, foi adotada a padronização requerida pelo periódico: *Continental Shelf Research*. Esta revista foi escolhida devido ao seu Qualis A2 nas duas áreas de interesse à possíveis programas de pós-graduação (Biodiversidade e Engenharias), além da sua abrangência e seu fator de impacto no meio acadêmico (2,088).

CAPÍTULO I

A CARGA DE FUNDO ATRAVÉS DE EQUAÇÕES DETERMINÍSTICAS NA DESEMBOCADURA SUL DO COMPLEXO ESTUARINO DE PARANAGUÁ

Resumo

O atrito entre a massa de água e o fundo dos corpos aquosos produz a movimentação de grãos de sedimentos, que são transportados e depositados em regiões diferentes à sua fonte. O objetivo deste trabalho foi estimar a capacidade de transporte de sedimentos a partir de correntes de maré, ao longo de uma seção transversal na desembocadura sul do Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP), durante um ciclo de maré de sizígia. Os dados relativos às correntes de maré foram obtidos de um banco de dados pré-existente. Foram coletados sedimentos transportados por carga de fundo em três estações ao longo de uma seção transversal na desembocadura, durante um ciclo de maré, utilizando um amostrador físico do tipo *Helley-Smith*. As taxas previstas de transporte foram calculadas a partir de metodologia descrita na literatura. Foram testadas nove equações a partir de uma regressão linear tipo II e do teste de razões, para a definição da formulação teórica mais adequada para a região. Dentre as equações testadas, Meyer-Peter & Müller (MM) foi a que apresentou o melhor comportamento segundo os dois testes realizados. Por outro lado, a equação de van Rijn (VR) apresentou um bom comportamento, possuindo maior versatilidade. Ambas as equações descrevem a desembocadura como uma exportadora de sedimentos, com uma ordem de magnitude de $10^4 \text{ m}^3.\text{ano}^{-1}$. Estes sedimentos exportados são, provavelmente, os responsáveis pelo assoreamento do canal navegável dragado à sudeste do transecto estudado. A origem deste material não ficou completamente evidente, mas três hipóteses são sugeridas para identificar a área-fonte destes sedimentos.

Abstract

The shear between water masses and sedimentary bottoms produces friction, which promotes sediment transport. These sediments move either as bed load or suspended load, and are deposited in regions away from their sources. The objective of this study was to assess the deterministic bed load equation in literature that can best describe the ability of the tidal currents in the southern inlet of Paranaguá Estuarine Complex (PEC) to transport sediments, during a spring tidal cycle. The current data used was obtained from a previous study, with similar meteorological conditions. Field data of sediment transport was obtained using a modified *Helley-Smith* sampler along the extension of the inlet, during a semi-diurnal tidal cycle, in three stations defined according to the bathymetric setting. Predicted sediment transport was calculated following methodology described in literature, and both sets of data were compared. Both a tendency test and the ratio of predicted and measured transport were used to evaluate the best deterministic equation. Of all equations tested, the Meyer-Peter & Müller (MM) had the best overall performance, and the Van Rijn (VR) equation performed almost as good, but has a broader applicability as it can account for wave action. Both equations describe the inlet as exporting sediments, with an order of magnitude of $10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{year}^{-1}$. These sediments are most likely responsible for the shoaling of the navigable channel just southeast of the studied transect. The origin of this material is not clear, and three hypotheses are suggested to evaluate the possible sources of this sediments.

Notação

$U_{w_{cr}}$ – velocidade orbital crítica	β – declividade do fundo
U_w – velocidade orbital	f_{silt} – fator siltico ($6.2 \times 10^{-5} / d_{50}$)
θ_{cr} – parâmetro de <i>Shields</i> crítico	ρ – densidade da água
θ – parâmetro de <i>Shields</i>	ρ_s – densidade do grão (2650 kg.m^{-3})
τ'_c - Estresse por correntes	d_{50} – diâmetro mediano do grão
τ'_{cr} - Estresse crítico por correntes	ϕ_i – ângulo de repouso dos sedimentos ($\approx 28^\circ$)
Φ – transporte por carga de fundo adimensional	g - gravidade (9.81 m.s^{-2})
q_b – transporte por carga de fundo	b – declividade da reta de regressão
s – razão de densidades (ρ_s / ρ)	R – coeficiente de correlação
D_* - diâmetro adimensional do grão	R^2 – coeficiente de determinação

1. Introdução

Na modalidade do transporte marinho e/ou aluvial, são reconhecidas três formas principais: em suspensão (*suspended load*), por lavagem (*wash load*) e/ou por carga de fundo (*bed load*) (Sousby, 1997). O transporte por carga de fundo é o processo responsável pela conexão entre as condições hidráulicas e a morfologia de canais (Gomez, 1991), gerando diversas possibilidades de mudanças na morfologia de áreas costeiras.

A efetividade na ressuspensão e transporte de sedimentos apresenta um caráter complexo devido à mistura entre diferentes diâmetros de partículas. A mudança de granulometria entre siltes e areias pode marcar a diferença entre sedimentos coesivos e não coesivos, de forma a influenciar na capacidade das

correntes de maré em efetuar o transporte (Soulsby, 1997). Amos *et al.* (2010) identificaram que mesmo as areias muito finas podem ser transportadas por carga de fundo, sendo que a partir desta fração, grãos menores tendem a entrar diretamente em suspensão. Assim, de modo geral, o transporte de sedimentos é dependente da rugosidade de fundo. A rugosidade total só é significativa no caso de fluxos combinados (ondas + correntes), não sendo importantes no caso de correntes estuarinas (Van Rijn, 2007).

Diversas equações para predição do transporte sedimentar por carga de fundo foram propostas na literatura (Meyer-Peter & Müller, 1948; Bagnold, 1963; Yalin, 1963; Wilson, 1966; Ashida & Michiue, 1972; van Rijn, 1984; Madsen, 1991; Nielsen, 1992; Cámenen & Larson, 2005; Van Rijn, 2007). No geral, o conhecimento utilizado nas ponderações baseia-se nas forças hidrodinâmicas associadas ao transporte (correntes, ondas ou uma combinação de ambas), e às características sedimentares e batimétricas da região. Em um contexto geral, as fórmulas foram idealizadas para fluxos fluviais, entretanto podem ser aplicadas para correntes de maré em escalas instantâneas, pois apresentam um mesmo comportamento que a vazão de um rio. Porém, é difícil estabelecer uma correlação entre dados *in situ* e teóricos com uma acurácia menor que um fator 2 para rios, podendo chegar até um fator 5 no caso de ambientes marinhos (Soulsby, 1997), devido a alta variabilidade inerente aos processos de transporte. Por essa razão, não é realístico avaliar uma fórmula apenas com base em sua capacidade de duplicar valores medidos, ou apenas de reproduzir uma tendência (Gomez, 1991).

O objetivo deste trabalho foi avaliar dentre as diferentes equações determinísticas para o transporte por carga de fundo propostas na literatura, a que melhor descreve a capacidade da desembocadura sul do Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP) em transportar sedimentos por carga de fundo, identificando as prováveis magnitudes em que este processo ocorre e as possíveis origens deste material.

1.1 Área de Estudo

A desembocadura sul do Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP), localizada na porção centro-norte do litoral paranaense (Fig. 1.1), apresenta um regime de marés predominantemente semi-diurno, com amplitudes inferiores a 2 m na desembocadura (Marone & Jamiyanaa, 1997). Com relação ao padrão de circulação, Noernberg *et al.* (2007) verificaram que as correntes de maré acompanham a via de navegação, com uma preponderância das correntes de maré vazante sobre as de enchente em toda a coluna d'água. Essa preponderância das correntes de vazante também foi reportada por Lana *et al.* (2001) e Mantovanelli *et al.* (2004), este último indicando uma diferença de até 48% na intensidade média das correntes entre os momentos de maré.

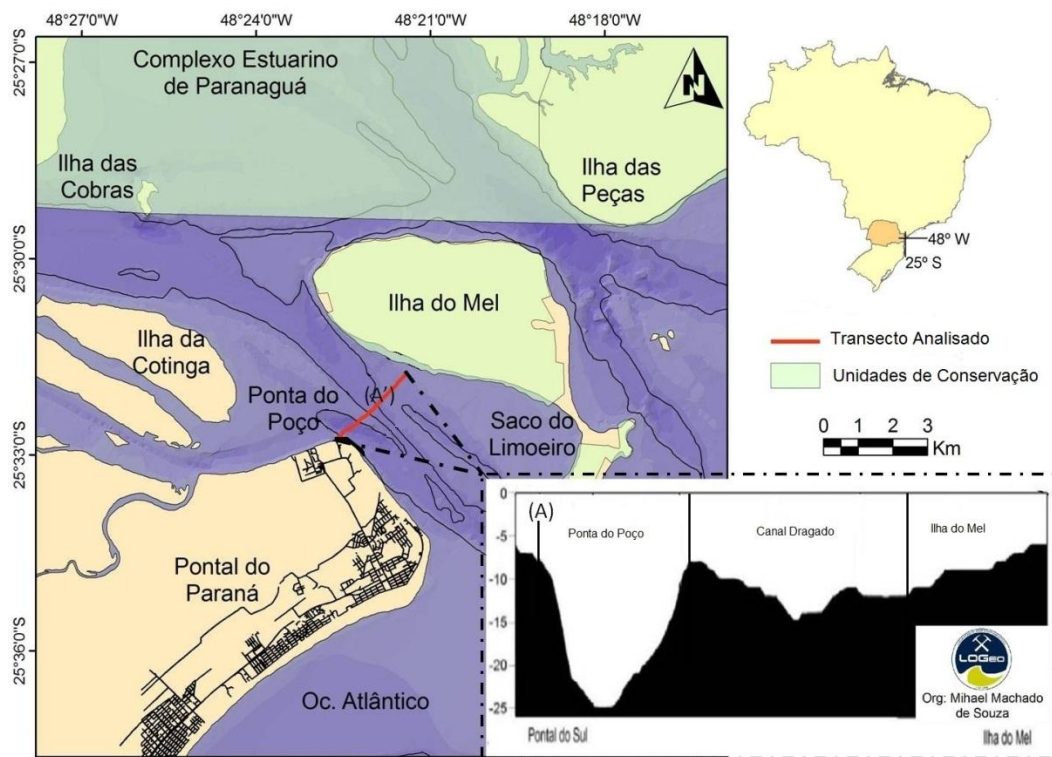


Figura 1.1 – Visão geral da desembocadura do Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP), com o detalhe da batimetria no transecto estudado no qual foram obtidas as amostras de transporte por carga de fundo e os dados de

correntes.

Segundo Lana *et al.* (2001) as ondas que adentram a desembocadura sul do CEP provém preferencialmente do quadrante SE, com altura média de 0,5 m, e períodos variando entre 3 e 7 s, atingindo uma altura máxima de 2 a 3 m nos eventos de tempestade. Noernberg *et al.* (2007) salientaram que a turbulência gerada por estas ondas atua amplificando o transporte por carga de fundo, e promovendo o assoreamento do canal navegável aos portos costeiros do Paraná.

O diâmetro médio dos sedimentos de fundo distribuídos na região varia entre as areias finas, na porção interna da desembocadura, às areias médias, na sua região externa, onde a ação das ondas é mais efetiva. Os graus de seleção variam entre bem e muito bem selecionados, com teores de carbonatos e de matéria orgânica abaixo dos 5% e porcentagens de finos inferiores a 10% (Lamour *et al.*, 2004).

O contexto batimétrico da região mostra a ocorrência de um delta de maré vazante na porção externa do CEP, e um hemi-delta de maré enchente na área chamada Saco do Limoeiro, disposto junto a face oriental da Ilha do Mel (Angulo, 1999). Estes deltas evidenciam o ambiente sedimentar nas adjacências do CEP. Além disso, dragagens periódicas são necessárias para manter as profundidades desejáveis ao longo do canal (Lamour & Soares, 2008), o que demonstra a efetividade do transporte sedimentar na região.

2. Metodologia

2.1 Série de Dados

Os dados de correntes foram obtidos a partir de levantamentos realizados na região com o uso de um correntômetro acústico ADP-Sontek, no contexto do projeto de cooperação Brasil-Alemanha DESPORT (Marone *et al.*, em prep.), ao longo de uma seção transversal entre a Ponta do Poço e a Ilha do Mel (Fig. 2.1).

Foram realizadas medições a cada hora, durante dois ciclos semi-diurnos completos de sizígia (26 h) em Fevereiro de 2008.

Os dados relativos à altura significativa e período de ondas foram consultados de Lana *et al.* (2001), com o intuito de verificar a influência desta forçante na região, através do cálculo do limiar de transporte por ondas ($U_{w_{cr}}$).

Uma análise prévia dos dados de batimetria indicou a necessidade de uma divisão da seção transversal em três segmentos, devido a profundidade média, para a análise do transporte, sendo denominados: Ponta do Poço (PP) – 24 m, Canal Dragado (CD) – 14 m, e Ilha do Mel (IM) – 8 m (Fig. 1A).

2.2 Dados de Campo

Os dados de transporte por carga de fundo em campo foram obtidos com um amostrador do tipo Helley-Smith (Helley & Smith, 1971), adaptado com uma malha de 63 μ m. A armadilha foi submergida a cada hora por 5 minutos, ao longo de um ciclo de maré de sizígia (13 h) para as três estações, em Março de 2012. O tempo de submersão foi adotado como forma de redução dos efeitos de colmatação do ensacador, e na tentativa de evitar que mais que 40% da sua capacidade fosse excedida (Emmet, 1981), o que pode reduzir a sua eficiência. As amostras coletadas foram secas e pesadas em balança de precisão (10^{-4}), e analisadas em um granulômetro laser MICROTRAC *Bluewave* para verificar se o tamanho médio dos grãos capturados correspondiam ao encontrado no fundo. Posteriormente, foram analisadas também quanto ao seu grau de arredondamento, utilizando um Analisador de Formas digital (SIA) acoplado ao granulômetro.

Ainda, foram obtidas amostras de sedimentos de fundo de cada estação utilizando uma draga busca-fundo do tipo *Petite Ponar*, para verificar sua compatibilidade com os dados pretéritos descritos para a região e com os sedimentos capturados pela armadilha. As amostras de sedimentos de fundo foram processadas seguindo o mesmo método utilizado em Lamour *et al.* (2004) para preservar o potencial de comparação dos resultados. Esta comparação de

dados serviu para verificar se houve mudanças significativas nos sedimentos de fundo já relatado para a região, e se houve alguma seletividade nos sedimentos capturados pela armadilha.

2.3 Definição da Melhor Equação

Tanto as taxas de transporte sedimentar por carga de fundo obtidas em campo quanto as preditas pelas equações foram padronizadas em $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$, e comparadas utilizando uma regressão do tipo II (Sokal & Rohlf, 1995) no *software* R 2.15, usando o pacote “smatr”. Este teste foi realizado para verificar a capacidade das fórmulas de reproduzir a tendência de uma relação ideal entre taxas preditas e medidas, representadas por $b = 1$. Neste teste, aceitar H_0 significa que as retas possuem relação entre si, e quanto menor o valor desta correlação (R), melhor a relação (Warton *et al.*, 2006).

Além disso, foram plotadas as razões entre as taxas preditas e medidas em relação à velocidade dos fluxos, para avaliar a porcentagem de valores destas razões que se encontram no intervalo de um fator 0,5 a 3, conforme descrito por Soulsby (1997) para transporte por correntes. Dessa forma, espera-se que o uso de ambos os testes satisfaça o questionamento de Gomez (1991) quanto à validade da escolha de uma equação.

2.4 Estimativa do Transporte por Carga de Fundo

A partir das equações definidas como mais representativas da área de estudo, foi calculado o volume transportado médio em cada momento do ciclo de maré (enchente e vazante). Para isto, foi considerada a duração de cada momento do ciclo de maré como proposto por Marone & Jamiyanaa (1997), de 6,8 h para a enchente e 5,5 h para a vazante, e o volume médio transportado segundo cada equação. Essa assimetria na duração das marés também é reforçada por Mantovanelli *et al.* (2004), que indicou diferenças de até 3.6 h entre os dois momentos do ciclo de maré.

Com base nos valores ($\text{kg.m}^{-1}.\text{momento da maré}^{-1}$) para cada estação foi calculado o transporte residual líquido, e também uma média geral para toda a seção. Por fim, com base no valor líquido transportado pela média da seção, e considerando a seção com 3000 m de comprimento, obteve-se o volume líquido ($\text{m}^3.\text{ano}^{-1}$) de sedimentos transportados segundo a conversão proposta por Soulsby (1997). O valor foi dividido pela metade, para considerar apenas os momentos de maré de sizígia ao longo do ano, e transformados de massa (kg) para volume (m^3) através da divisão pela densidade média do quartzo (2650 kg.m^3).

3. Teoria

Para o cálculo das taxas previstas foi seguido o método proposto por Soulsby (1997), modificando-se o limiar de transporte (Shields crítico - θ_{cr}) segundo van Rijn (2007) para fundos compostos por areias finas. Também foi calculado o limiar de transporte por ondas (Uw_{cr}), ainda segundo Soulsby (1997), para as três regiões propostas, para verificar se há uma efetiva ação de ondas.

Foram utilizadas nove equações de transporte por carga de fundo, sete das quais segundo a compilação de Soulsby (1997):

$$\phi = 8(\theta - \theta_{cr})^{3/2} \quad (1; \text{Meyer-Peter \& Müller, 1948 - MM})$$

$$\phi = F_B \theta^{1/2} (\theta - \theta_{cr}) \quad (2; \text{Bagnold, 1963 - BA})$$

$$\text{com: } F_B = \frac{0,1}{C_D^{0,5} (\tan \varphi_i + \tan \beta)}$$

φ_i = ângulo de repouso dos sedimentos (areias submersas $\approx 28^\circ$).

β = declividade do fundo.

$$\phi = F_Y \theta^{0,5} (\theta - \theta_{cr}) \quad (3; \text{Yalin, 1963 - YA})$$

$$\text{com: } F_Y = \frac{0,635}{\theta_{cr}} \left[1 - \frac{1}{aT} \ln(1 + aT) \right]$$

$$a = 2,45 \theta_{cr}^{0,5} s^{-0,4}$$

$$T = (\theta - \theta_{cr})/\theta_{cr}$$

$$\phi = F_M(\theta^{0,5} - 0,7\theta_{cr}^{0,5})(\theta - \theta_{cr}) \quad (4; \text{Madsen, 1991 - MA})$$

com: $F_M = 8/\tan\varphi_i$ para grãos em rolamento.

$F_M = 9,5$ para grãos em saltação.

$$\phi = 17(\theta^{0,5} - \theta_{cr}^{0,5})(\theta - \theta_{cr}) \quad (5; \text{Ashida \& Michiue, 1972 - AM})$$

$$\phi = 12\theta^{3/2} \quad (6; \text{Wilson, 1996 - WI})$$

$$\phi = 12\theta^{0,5}(\theta - \theta_{cr}) \quad (7; \text{Nielsen, 1992 - NI})$$

Ainda, foram utilizadas as equações propostas por Cámenen & Larson (2005; CL) e Van Rijn simplificada (2007; VR), considerando apenas dados de correntes:

$$\phi = 12\theta^{1,5} \exp(-4,5 \frac{\theta_{cr}}{\theta}) \quad (8; \text{Cámenen \& Larson, 2005 - CL})$$

$$q_b = 0,5\rho_s f_{silt} d_{50} D_*^{-0,3} (\tau'_c/\rho)^{0,5} (\tau'_c - \tau_{cr}/\tau_{cr})^1 \quad (9; \text{Van Rijn, 2007 - VR})$$

com: $f_{silt} = 1$, para $d_{50} > 62 \mu\text{m}$.

Todas as equações, com exceção à de Van Rijn (2007), fornecem o valor do transporte por carga de fundo adimensional. Assim, estes valores devem ser convertidos em transporte por carga de fundo pela relação:

$$\phi = \frac{q_b}{[g(s-1)d_{50}^3]^{1/2}} \quad (10)$$

4. Resultados

4.1 Séries de Dados e Dados de Campo

A análise da curva de maré para o período de 2008, quando os dados de correntes foram obtidos, e a curva de maré de 2012, quando os dados de transporte foram coletados, demonstra amplitudes e comportamento similares (Fig. 1.2) entre os momentos. Porém, a variação da maré em 2008 foi cerca de 0,2

m superior à amplitude em 2012, o que pode indicar correntes de maré ligeiramente mais intensas neste período. Para cada seção foi calculada a velocidade média das correntes ao longo do ciclo de maré, obtendo-se valores de até $0,9 \text{ m.s}^{-1}$.

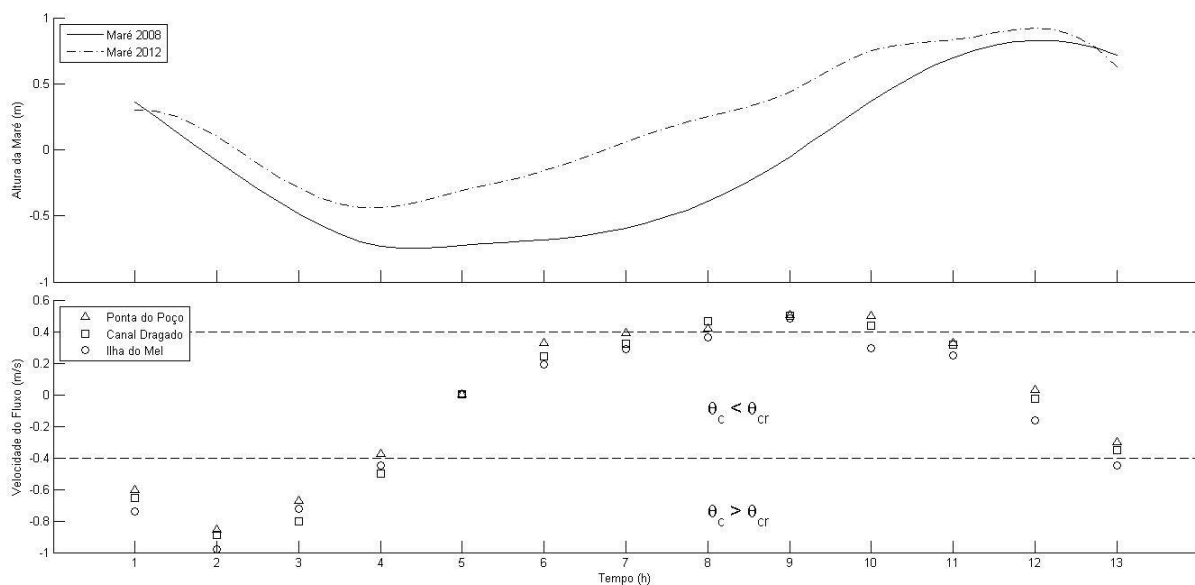


Figura 1.2 – Curvas das marés de 2008 e 2012, mostrando uma variação efetiva na amplitude de 0,2 m (acima). Abaixo, gráfico com a velocidade do fluxo ao longo do ciclo de maré (em m.s^{-1}), com a faixa de transporte nulo.

De modo geral, as taxas obtidas a partir da captura pela armadilha foram menores que as taxas previstas pelas equações (Tabela 1.1). A maior taxa obtida em campo foi de $25,9 \times 10^{-3}$ para a PP, $17,8 \times 10^{-3}$ para o CD, e $2,42 \times 10^{-3}$ para a IM, todas em $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$. Já para as equações, o maior valor obtido foi para MA, $70,2 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$.

Tabela 1.1 – Resumo das taxas obtidas (em $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$) com o amostrador físico e das previstas a partir das velocidades de fluxo pelas equações. As amostras com (*) foram removidas das análises estatísticas por serem consideradas outliers.

Vel.	Medido	AM	BA	CL	MA	MM	NI	VR	WI	YA
------	--------	----	----	----	----	----	----	----	----	----

	m.s. ⁻¹	x 10 ⁻³	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	1		10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻³
PP	0,61	9,69	1,46	0,81	0,74	3,40	2,19	3,69	1,94	7,68	0,51
PP	0,85	2,36	10,4	2,88	6,23	18,0	9,50	15,2	10,6	20,8	4,60
PP(*)	0,67	25,9	2,82	1,21	1,47	5,82	3,49	5,79	3,43	10,2	1,06
PP	0,51	0,50	0,25	0,29	0,16	0,85	0,71	1,15	0,38	4,49	0,07
PP	0,50	0,21	0,16	0,25	0,13	0,69	0,60	0,96	0,28	4,23	0,05
CD	0,65	1,97	3,83	1,67	2,04	7,55	4,30	7,24	3,76	11,9	1,52
CD	0,89	16,1	18,6	5,07	11,9	30,5	15,2	24,2	15,6	30,6	8,99
CD	0,80	17,8	11,4	3,52	6,92	19,7	10,2	16,5	10,1	22,2	5,21
CD	0,50	0,75	0,48	0,50	0,27	1,46	1,03	1,83	0,52	5,42	0,15
CD	0,47	1,12	0,21	0,32	0,15	0,82	0,64	1,12	0,21	4,50	0,06
CD	0,50	0,05	0,48	0,50	0,27	1,46	1,03	1,83	0,52	5,42	0,15
CD	0,44	0,71	0,06	0,17	0,08	0,35	0,34	0,53	0,03	3,70	0,02
IM	0,74	0,13	13,3	3,79	8,02	23,0	10,5	19,3	10,4	26,3	7,17
IM(*)	0,98	0,25	45,0	9,88	31,0	70,2	31,1	51,9	31,4	61,0	28,5
IM	0,72	0,81	11,7	3,45	6,91	20,5	9,34	17,5	9,26	24,2	6,17
IM	0,45	0,04	0,37	0,44	0,24	1,29	0,40	1,70	0,27	5,91	0,13
IM	0,49	2,42	0,97	0,74	0,51	2,59	1,01	3,04	0,83	7,63	0,36
IM	0,45	0,01	0,37	0,44	0,24	1,29	0,40	1,70	0,27	5,91	0,13

*Amostras removidas das análises estatísticas por serem consideradas outliers.

Quanto às amostras de sedimentos de fundo, verificou-se que não houve alteração em relação aos resultados relatados por Lamour *et al.* (2004), compreendidas na classe das areias finas. Ainda, uma análise granulométrica dos sedimentos capturados na armadilha mostra que não existe diferença significativa entre os sedimentos de fundo e os que se encontravam no ensacador. Este padrão se estende também entre as estações (Fig. 1.3), já que os sedimentos capturados estão na faixa das areias finas, bem selecionadas. Por fim, a análise da forma dos sedimentos capturados revela que eles possuem alto grau de arredondamento (Fig. 1.4), evidenciando o seu desgaste e consequente grau de

maturidade avançado.

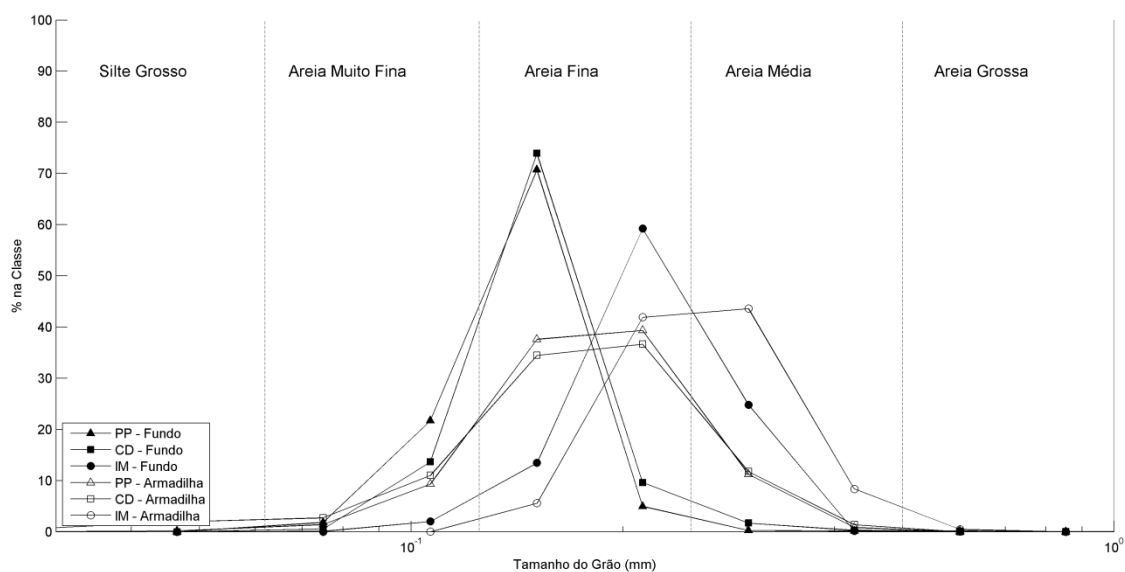


Figura 1.3 – Distribuição do tamanho do grão dos sedimentos coletados pela armadilha nas três estações.

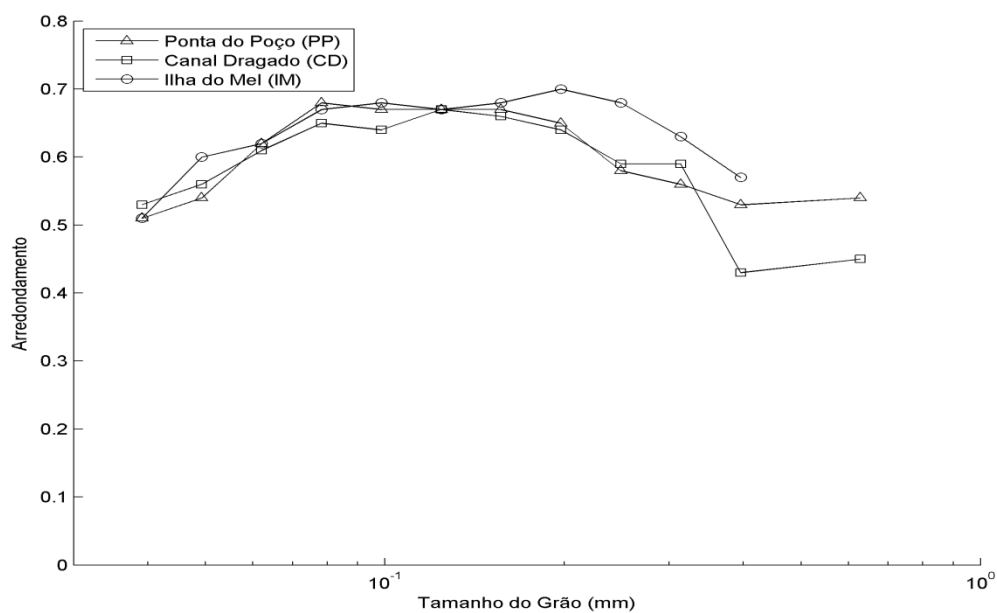


Figura 1.4 – Porcentagem de arredondamento dos sedimentos capturados pela armadilha em cada uma das estações amostrais.

Quanto ao Uw_{cr} calculado para a região, o valor aproximado para as três

estações foi de $0,14 \text{ m.s}^{-1}$ ($\pm 7 \times 10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$). Este limiar foi excedido apenas na IM, onde teve uma ordem de magnitude acima dos demais compartimentos, apresentando valor de $0,15 \text{ m.s}^{-1}$, considerando os dados de onda de Lana *et al.* (2001). Em condições de tempestade, nas quais se espera que as alturas de ondas sejam maiores, é provável que haja uma maior influência deste parâmetro.

4.2 Definição da Melhor Equação

Em relação à comparação entre as formulações teóricas e os dados de campo, observou-se que para todas as equações a regressão tipo II foi significativa ($P_{valor} < 0,05$), obtendo-se valores de R^2 de até 0,39 (equação de MM). Em relação ao teste de tendência (Fig. 1.5), apenas quatro fórmulas aceitaram H_0 , e possuem uma tendência próxima a ideal (MM, VR, AM e NI).

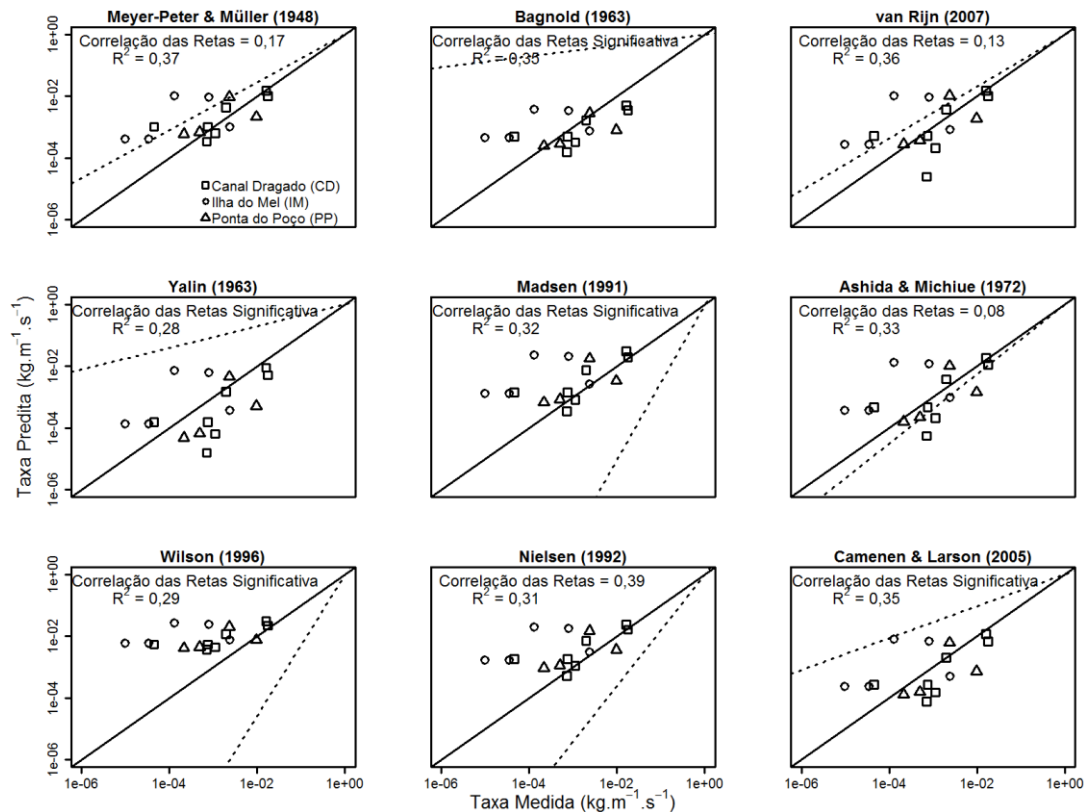


Figura 1.5 – Regressão tipo II entre as formulações teóricas (eixo x) e os

dados medidos *in situ* (eixo y). Em destaque, o índice de determinação (R^2) e a correlação entre as retas da regressão (linha pontilhada) e a reta ideal (linha sólida).

No referente às razões (Fig. 1.6), a porcentagem de dados dentro do intervalo de 0,5 a 3 mais alto foi de 50%, para a equação de MM, com apenas outras 3 equações mantendo-se acima dos 40% (VR, MA e NI).

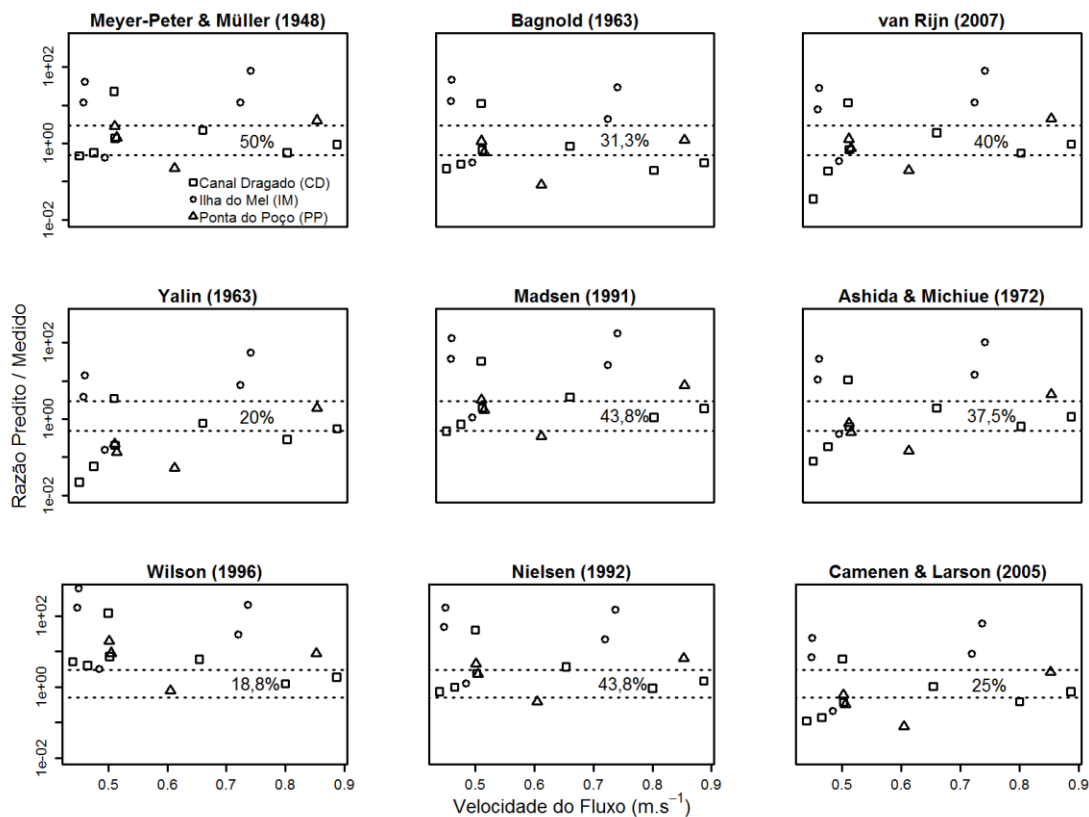


Figura 1.6 – Razão entre taxas previstas e mensuradas em relação à velocidade das correntes. Linha pontilhada marca o intervalo de um fator 0,5 a 3, com a porcentagem dos dados dentro deste intervalo incluída.

4.3 Estimativa do Transporte por Carga de Fundo

A partir das equações de MM e VR, definidas como as mais representativas

para a região, a quantidade de sedimentos transportados foi calculada em cada momento do ciclo de maré (Fig. 1.7). Como as duas equações se comportaram de forma muito parecida, não houve grandes diferenças entre os volumes calculados por cada uma delas.

Pôde-se verificar que houve uma grande diferença entre o volume transportado na enchente e na vazante, com diferença de uma ordem de magnitude entre estes momentos. De modo geral, o transporte na enchente esteve abaixo dos 20 kg.m^{-1} , enquanto o transporte na vazante chegou até 170 kg.m^{-1} . Esta assimetria entre os volumes de sedimento entrando e saindo pela desembocadura gera um transporte residual líquido de sedimentos com sentido estuário afora, na ordem de 10^2 kg.m^{-1} .

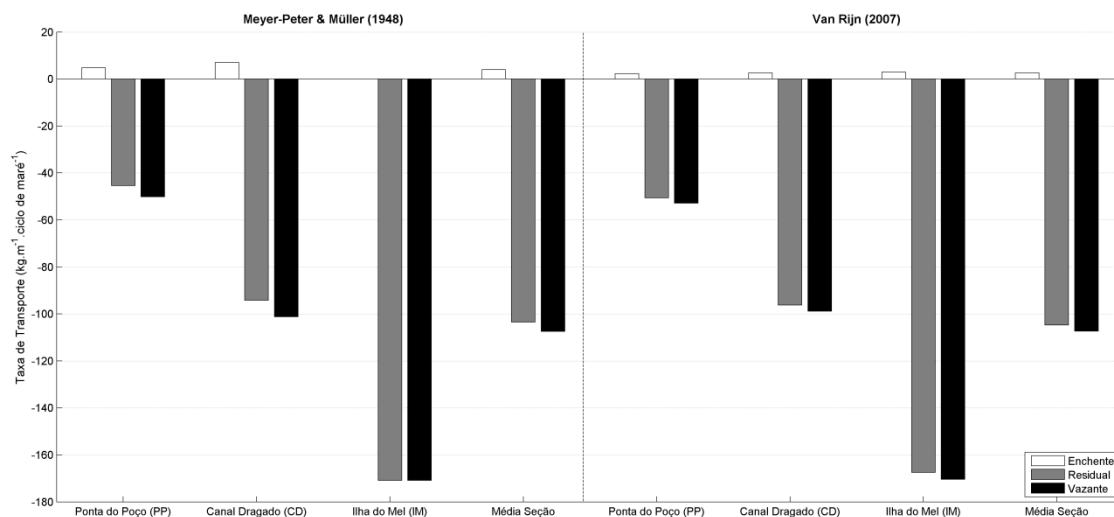


Figura 1.7 – Quantidade de sedimentos transportados ($\text{kg.m}^{-1}.\text{Ciclo de Maré}^{-1}$) a partir da equação de Meyer-Peter & Müller (1948) e Van Rijn (2007) para a seção de estudo.

Quando fazemos a conversão do volume transportado em um ciclo de maré para a taxa transportada por ano obtemos um valor, para o transporte total da seção, de $94.779 \text{ m}^3.\text{ano}^{-1}$ para a equação de VR e $93.807 \text{ m}^3.\text{ano}^{-1}$ para a equação de MM, considerando apenas as marés de sizígia.

5. Discussão

5.1 Dados Pretéritos e de Campo

A diferença em amplitudes de maré entre 2008 e 2012 pode ter sido uma das responsáveis por, de maneira geral, as taxas preditas terem sido maiores que as taxas mensuradas. Apesar disso, essa diferença não parece ter impedido a correlação entre os dois conjuntos de dados.

No caso das amostras removidas dos testes estatísticos por terem sido consideradas outliers, à amostra da Ponta do Poço pode-se supor que o amostrador tenha agido como uma draga no instante de sua recuperação para a superfície. Este comportamento, descrito na literatura por Emmet (1981), pode ter gerado uma taxa de captura mais elevada que aquela esperada pelo fluxo inferido para aquele momento. Já para a amostra da Ilha do Mel, o fluxo inferido é muito alto para uma taxa de transporte coletada tão baixa. Pode-se supor que tenha havido perda de material durante a recuperação da armadilha.

Quanto à granulometria na região, a baixa porcentagem de finos e o alto grau de seleção das amostras reduzem os possíveis erros associados a matrizes sedimentares heterogêneas e a efeitos de coesividade, que segundo Soulsby (1997) alteram o transporte sedimentar e diminuem a confiabilidade das equações preditivas. Além disso, o fato dos sedimentos possuírem um alto grau de arredondamento demonstra que esse material sofreu retrabalhamento, encontrando-se, provavelmente, longe de sua área de origem.

A única estação onde o U_w calculado ultrapassou o $U_{w_{cr}}$ foi à IM. Estes valores demonstraram que o potencial de transporte das ondas na região é pequeno, mostrando uma redução na efetividade desta forçante em relação ao encontrado por Noernberg *et al.* (2007) para a porção imediatamente à saída do estuário (plataforma interna). Além disso, o fato da IM ser a única porção aparentemente afetada por ondas pode explicar porque, para esta região, as taxas obtidas foram não foram condizentes com as taxas preditas pelas equações, devido às interações correntes-ondas.

5.2 Definição da Melhor Equação

Dentre todas as equações testadas neste trabalho, apenas três obtiveram bons desempenhos em ambos os testes (VR, MM e NI).

Soulsby (1997) salienta que a equação de WI é indicada em condições de fundo plano de fluxo superior (*sheetflow*), o que fica evidente no gráfico de razões (Fig. 1.6), em que a maior parte dos valores encontra-se acima de um fator 3.

Villatoro *et al.* (2010), em um estudo similar, identificaram que a equação de YA apresentou uma dispersão acentuada nos valores preditos, tal qual neste estudo, como pode ser verificado no gráfico de razões (Fig. 1.6). Ainda, verificaram que a equação de BA tendeu a superestimar o transporte. Neste trabalho, esta equação apresentou uma reta de tendência quase sem inclinação, não representando bem os dados medidos, já que seus valores não apresentaram muita variabilidade temporal.

As equações de NI, AM, MA e CL apresentaram comportamentos parecidos entre as razões, porém com tendências diferentes. A partir da análise de ambos os gráficos, podemos supor que as constantes da equação de AM apresentaram o melhor ajuste em relação aos dados testados neste trabalho. A sua tendência esteve mais próxima à ideal dentre todas as equações, com uma porcentagem razoável (37,5 %) de dados no intervalo de razões analisado.

As equações de VR e MM foram as que melhor representaram os dados mensurados quando levados em conta os dois testes realizados. A equação de VR possui uma ampla base de dados ao qual foi calibrada, mas tende a subestimar o transporte em velocidades abaixo de $0,6 \text{ m.s}^{-1}$, como ressaltado pelo próprio autor (Van Rijn, 2007). Esta subestimação pode ser verificada pelo gráfico de razões (Fig. 1.6), constituindo a principal diferença entre seu desempenho em relação à equação de MM. A vantagem desta equação é sua possibilidade de ser utilizada em fluxos combinados, no qual a ação de ondas e correntes é esperada, já que ela inclui parâmetros de ondas na sua formulação.

A equação de MM apresentou o melhor resultado das razões, e uma boa tendência em relação à reta ideal. Aparentemente, esta equação é a que melhor

descreveu os dados mensurados, e seria a mais adequada para representar o transporte por carga de fundo na região da desembocadura sul do CEP. Além disso, esta equação é frequentemente utilizada na literatura, como salientado por Van Rijn (2007), indicando uma boa performance em uma variedade de ambientes.

Porém, vale salientar que em ambos os gráficos as amostras referentes à IM apresentaram-se fora do fator 0,5 a 3, e com um comportamento bem diferente do esperado considerando uma tendência ideal (Fig. 1.2 e 1.3). Este fato provavelmente está associado à influência de ondas nesta porção do transecto, já que foi o único local em que a velocidade orbital das ondas excedeu o valor limite. Como neste trabalho não foram mensurados dados referentes à ação das ondas, decidiu-se não incluir este parâmetro nas formulações. Caso este parâmetro estivesse disponível, seu uso na equação completa de VR poderia ter melhorado os resultados, principalmente nas amostras referentes a essa região.

5.3 Estimativa do Transporte por Carga de Fundo

A partir do transporte de massa residual determinado de aproximadamente $10^2 \text{ kg.m}^{-1}.\text{ciclo de maré}^{-1}$ sentido estuário afora, pode-se verificar que a desembocadura sul do CEP está atuando como uma exportadora de material para o sistema costeiro adjacente. Mantovanelli *et al.* (2004) e Noernberg *et al.* (2007) já haviam verificado a preponderância das correntes de vazante em relação as correntes de enchente em porções distintas do estuário. Ainda segundo Noernberg *et al.* (2007), além de maior intensidade, as correntes de vazante possuem também uma menor variação na sua direção que as de enchente, o que intensifica sua componente longitudinal. Esta preponderância das correntes de vazantes também é corroborada por evidências geomorfológicas na região, a partir do trabalho de Angulo (1999).

Este trabalho tratou um conjunto de dados correntográficos, obtidos num momento específico do ano, o que dificulta precisar o volume absoluto transportado na desembocadura sul do CEP. Porém, a partir dos valores médios

relativos à área de seção estudada, pode-se estimar o volume exportado líquido pelo sistema em aproximadamente $94.000 \text{ m}^3.\text{ano}^{-1}$ segundo a equação de MM para os momentos de sizígia. Conforme Noernberg *et al.* (2007), as correntes de maré na quadratura são menos competentes no transporte sedimentar, ultrapassando o limiar de movimento apenas durante os períodos de vazante. Assim, a contribuição das correntes nas quadraturas para o volume final não deve ser elevada. Apesar de não ser possível uma discussão em termos absolutos, há a indicação que o CEP, através da desembocadura sul, exporta uma quantidade de sedimentos na ordem de $10^4 \text{ m}^3.\text{ano}^{-1}$. Comparativamente, Villatoro *et al.* (2010), para as desembocaduras de Chioggia e Lido na Laguna de Veneza (Itália), quantificaram volumes de sedimentos exportados na ordem de 10^3 e $10^4 \text{ m}^3.\text{ano}^{-1}$, respectivamente. Considerando que eles possuem um ambiente com condições parecidas às encontradas neste estudo, a quantidade proposta neste trabalho parece ser coerente.

Lamour *et al.* (2004) realizou um mapeamento granulométrico ao longo do CEP, verificando que a porção central do estuário é dominada por lamas, enquanto a desembocadura e a cabeceira do estuário apresentam areias predominantemente. Dessa forma, é provável que não haja transferência de areias em quantidades significativas entre a cabeceira e a desembocadura do sistema (Fig. 1.8). Portanto, o material sendo exportado pela desembocadura sul teria que ser gerado localmente, ou advindo da própria plataforma interna rasa.

Devido ao alto nível de retrabalhamento apresentado pelos sedimentos capturados pela armadilha, a hipótese de produção local por intemperismo de rochas parece menos provável. Podemos supor que parte destes sedimentos exportados pode ser advinda do Saco do Limoeiro, na porção nordeste da desembocadura sul, que segundo Angulo (1999) apresenta ondas de areia com tendência de movimento orientada para o interior do estuário. Porém, a partir deste estudo, verificou-se que os sedimentos importados pela desembocadura apresentam uma magnitude pequena se comparada aos volumes exportados. Dessa forma, parece pouco provável que a desembocadura sul esteja importando sedimentos em quantidade significativa para balancear sua exportação apenas

com a contribuição do hemi-delta de enchente.

Sugerem-se três hipóteses para a origem deste material (Fig. 1.8):

I – Contribuição do eixo N-S do CEP através do aporte a partir dos rios Itaqui e Benito, ou por erosão e transporte dos sedimentos de fundo deste eixo.

II – Importação de sedimentos a partir da desembocadura norte do CEP, com o material realizando um movimento circular em torno da Ilha do Mel.

III – Erosão e transporte dos sedimentos de fundo que compõe o canal da Cotinga, com uma contribuição a partir dos rios que desembocam neste canal.

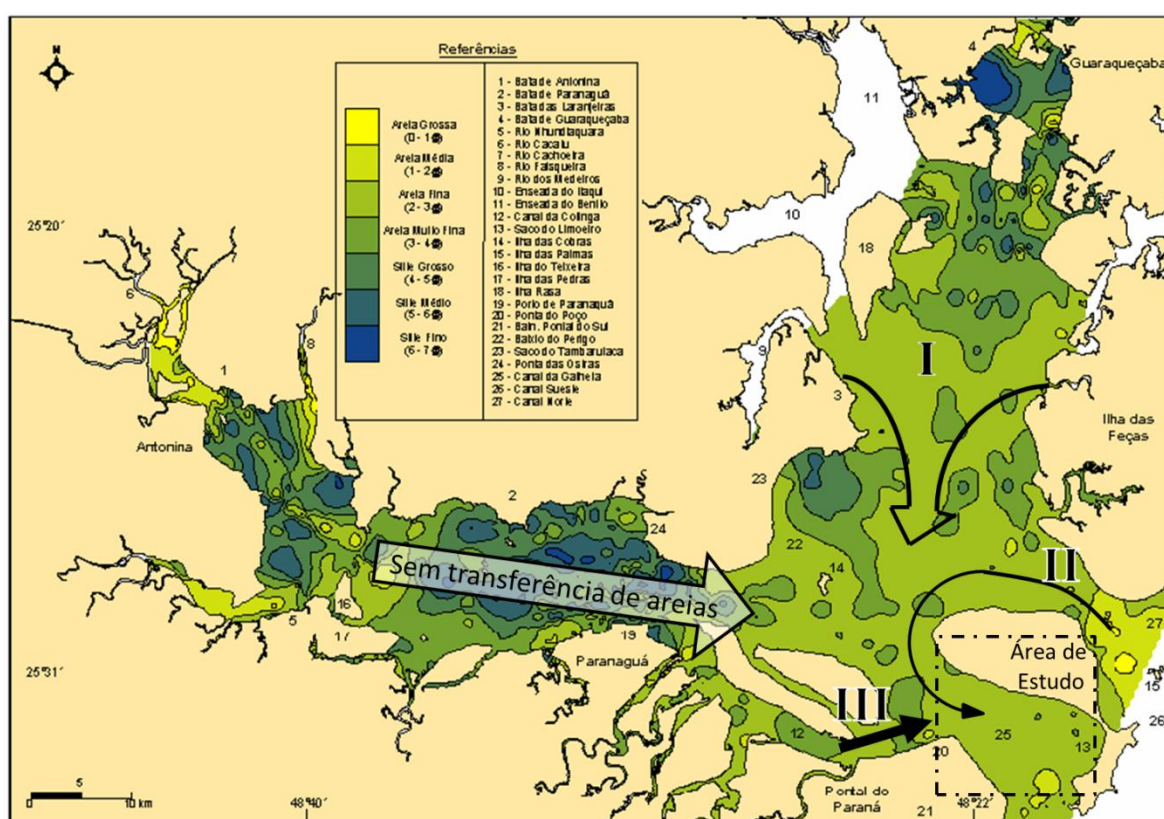


Figura 1.8 – Possíveis origens dos sedimentos sendo exportados pela desembocadura sul do CEP (I a III) (Adaptado de Lamour *et al.*, 2004).

A hipótese II pode ser inferida a partir dos dados de Angulo (1999), que caracteriza a desembocadura norte como sendo mais rasa, e através de imagens de satélite pôde verificar uma intensa quebra de ondas na região. As hipóteses I e

III não podem ser verificadas no momento, pois não há estudos da batimetria destas áreas ou da contribuição de sedimentos dos rios nestas porções do estuário.

Lamour *et al.* (2007) identificaram trechos críticos de assoreamento no canal dragado navegável próximo a seção de estudo. Em um destes trechos, ao sudeste do transecto avaliado, $93 \times 10^5 \text{ m}^3$ de sedimentos foram dragados para aprofundar o canal. Infelizmente, a falta de levantamento sucessivos na região após a dragagem impediu que estes autores calculassem a taxa de sedimentação no canal. Considerando o argumento de Gomez (1991) que o transporte por carga de fundo é o responsável pela conexão entre as forçantes hidrodinâmicas e a morfologia dos canais, pode-se supor que a maior parte dos sedimentos que estão assoreando esta porção do canal são exportados pela desembocadura. Essa suposição é razoável quando consideramos que dragagens periódicas são necessárias para manter as profundidades desejáveis ao longo do canal (Lamour & Soares, 2008).

6. Conclusão

O uso de dois testes estatísticos, a análise de tendência e as razões entre dados teóricos e mensurados, para a definição de uma equação mais adequada para a área de estudo mostrou-se útil, principalmente ao separar equações que apresentaram um bom desempenho apenas em algum dos testes (caso da equação de AM, que apresentou uma reta de tendência quase perfeita), ao invés de em ambos. Este resultado corrobora a afirmação de Gomez (1991) de que apenas considerar a capacidade de reproduzir uma tendência ou um resultado de uma equação é insuficiente.

Quando se deseja verificar o transporte por carga de fundo influenciado apenas por correntes estuarinas, a equação de Meyer-Peter & Müller (1948) mostrou ser a mais apropriada, além de ser mais simples (menor número de parâmetros). Porém, quando há a ocorrência de ondas, a equação de Van Rijn (2007) pode apresentar um resultado melhor, sendo a única capaz de incluir esta

forçante em consideração e, portanto, tornando-se mais indicada.

De modo geral, a desembocadura sul do Complexo Estuarino de Paranaguá possui uma competência maior para exportar sedimentos que importá-los para o sistema, devido à maior intensidade das correntes de vazante sobre as de enchente. Estimando o volume líquido exportado de sedimentos por carga de fundo a partir deste sistema, obtemos uma quantidade na ordem de $10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$.

A origem destes sedimentos exportados é incerta. Três hipóteses são sugeridas como possíveis áreas-fonte, porém mais estudos são necessários para identificar a origem deste material.

Referências

Amos, C.; Villatoro, M.; Helsby, R.; Thompson, C. E. L.; Zaggia, I.; Umgieser, G.; Venturini, V.; Are, D.; Sutherland, T. F.; Mazzoldi, A. 2010. The measurement of sand transport in two inlets of Venice lagoon, Italy. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 87: 225-236.

Angulo, R. J. 1999. Morphological characterization of the tidal deltas on the coast of the State of Paraná. *An. Acad. Bras. Ci.* 71: 935-959.

Ashida, K.; Michiue, M. 1972. Study on hydraulic resistance and bedload transport rate in alluvial streams. *JSCE, Tokyo*. 206: 59-69.

Bagnold, R. A. 1963. Mechanics of marine sedimentation, in: *The sea: ideas and observations*. Ed. M. N. Hill, vol 3. Nova York, 507-528.

Camenen, B.; Larson, M. 2005. A general formula for non-cohesive bed load sediment transport. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 63 (1-2): 249-260.

Emmet, W. W. 1981. Measurement of bed load in rivers. *Proceedings of the Florence Symposium*. 133: 3-15.

Gomez, B. 1991. Bedload transport. *Earth-Science Reviews*. 31: 89-132.

Helley, E. J.; Smith, W. 1971. Development and calibration of a pressure difference bedload sampler. USGS Water Resources Division Open File Report, 18 pp.

Lamour, M. R.; Soares, C. R.; Carrilho, J. C. 2004. Mapas dos parâmetros texturais dos sedimentos de fundo do Complexo Estuarino de Paranaguá – PR. *Boletim Paranaense de Geociências*. 55: 77-82.

Lamour, M. R.; Soares, C. R. 2008. A “Barra de Paranaguá” e a evolução batimétrica do delta de maré vazante na desembocadura do Complexo Estuarino de Paranaguá (PR), in: E. B. Boldrini, C. R. Soares & E. V. de Paula (Eds.), *Dragagens portuárias no Brasil: engenharia, tecnologia e meio ambiente*. Associação de Defesa do Meio Ambiente e Desenvolvimento de Antonina (ADEMADAN), Faculdades Integradas Espírita (UNIBEM), e Secretaria de Ciência e Tecnologia para Inclusão Social (MCT). Antonina, 69-87.

Lamour, M. R.; Angulo, R. J.; Soares, C. R. 2007. Bathymetrical evolution of critical shoaling sectors on Galheta Channel, navigable access to Paranaguá Bay, Brazil. *Journal of Coastal Research*. 23, 49-58.

Lana, P. C.; Marone, E.; Lopes, R. M.; Machado, E. C. 2001. The subtropical Estuarine Complex of Paranaguá Bay, Brazil, in: *Coastal Marine Ecosystems of Latin America*. Eds: U. Seeliger & B. Kjerfve. Ecological Studies. 144: 131-145.

Madsen, O. S. 1991. Mechanics of cohesionless sediment transport in coastal waters. *Coastal sediments*, ASCE. 15-27.

Mantovanelli, A.; Marone, E.; da Silva, E. T.; Lautert, L. F.; Klingenfuss, M. S.; Prata Jr., V. P.; Noernberg, M. A.; Knoppers, B. A.; Angulo, R. J. 2004. Combined

tidal velocity and duration asymmetries as a determinant of water transport and residual flow in Paranaguá Bay estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 59: 523-537.

Marone, E.; Jamiyanaa, D. 1997. Tidal characteristics and a numerical model for the M2 tide at the Estuarine Complex of the Bay of Paranaguá, Paraná, Brazil. *Nerítica*. 11: 95-107.

Meyer-Peter, E.; Müller, R. 1948. Formulas for bed-load transport. Rep. 2nd Meet. Int. Assoc. Hydraul. Struct. Res., Stockholm. 39-64.

Nielsen, P. 1992. Coastal bottom boundary layers and sediment transport. Advanced series in ocean engineering. World scientific publishing, Singapore.

Noernberg, M. A.; Marone, E.; Angulo, R. J. 2007. Coastal currents and sediment transport in paranagua estuary complex navigation channel. *Boletim Parananense de Geociências*. 60-61:45-54.

Sokal, R. R.; Rohfl, F. J. 1995. Biometry: The principles and practices of statistics in biological research (3rd ed.). W. H. Freeman and Company, Stony Brook, NY. 850 p.

Soulsby, R. 1997. Dynamics of marine sands: a manual for practical applications. Thomas Telford Publications, Londres, 249 p.

Van Rijn, L. C. 1984. Sediment transport part I: bed load transport. *Journal of Hydraulic Division*. 110: 1431-1456.

Van Rijn, L. C. Unified view of sediment transport by currents and waves. I: Initiation of motion, bed roughness and bed-load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 133, p. 649-667. 2007.

Villatoro, M.; Amos, C. L.; Umgiesser, G.; Ferrarin, C.; Zaggia, L.; Thompson, C. E. L.; Are, D. Sand transport measurements in Chioggia inlet, Venice lagoon: Theory versus observations. *Continental Shelf Research*, v. 30, p. 1000-1018. 2010.

Warton, D. I.; Wright, I. J.; Falster, D. S.; Westoby, M. Bivariate line-fitting methods for allometry. *Biological Reviews*, v. 81, p. 259-291. 2006.

Wilson, K. C. 1966. Bed-load transport at high shear-stress. *Journal of Hydraulic Division*. 92: 49-59.

Yalin, M. S. 1963. A expression for bed-load transportation. *Proceedings ASCE*. 89.

CAPÍTULO II

TRANSPORTE DE AREIAS EM SUSPENSÃO NA DESEMBOCADURA SUL DO COMPLEXO ESTUARINO DE PARANAGUÁ: UMA ABORDAGEM ATRAVÉS DE EQUAÇÕES PREDITIVAS E DADOS DE CAMPO

Resumo

O transporte em suspensão é o modo predominante em rios, canais de maré e praias arenosas, especialmente em altas velocidades de fluxo (acima do 1 m.s^{-1}). O objetivo deste trabalho foi definir o melhor perfil de concentrações na coluna d'água, assim como a melhor equação para o cálculo da concentração de ordem zero para a suspensão, e estimar o transporte nesta modalidade para a desembocadura sul do Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP). Para tanto, foram obtidos perfis da coluna d'água utilizando um CTD com turbidímetro acoplado, em três estações ao longo de uma seção transversal na desembocadura durante um ciclo de maré semi-diurna (13 h). Os dados de correntes utilizados foram obtidos de levantamento pretéritos na mesma seção, para condições meteorológicas semelhantes. Dentre os perfis de concentração e as equações avaliadas, as definições de Van Rijn (1984) foram as que se mostraram mais adequadas. Devido às baixas velocidades (menores que 1 m.s^{-1}), ocorreu uma aparente subestimação dos dados para fluxos próximos ao limiar de suspensão, o que sugere a necessidade de uma adaptação para a equação de Van Rijn. O volume de sedimentos transportados estimado para a desembocadura, através da suspensão, esta na ordem de $10^5 \text{ m}^3.\text{ano}^{-1}$ sentido estuário afora. Porém, ocorre uma discrepância nos resultados obtidos com o CTD em relação às equações e aos dados de fluxos. Acredita-se assim, que esta diferença seja devido à presença de uma carga de lavagem.

Abstract

Suspended transport is the predominant mode of transportation in rivers, tidal channels and sandy beaches, especially in high velocities (above 1 m.s^{-1}). The goal of this study was to define the best suspended sediment concentration profile in the water column and the best equation for the zero order concentration of suspension, and to estimate suspended transport in the Paranaguá Estuarine Complex (PEC) southern inlet. Water column profiles of suspended sediments were obtained with a turbidity sensor coupled to a CTD, in three stations along a cross-section of the inlet, during a complete semi-diurnal tidal cycle (13 h). The current data used was obtained from a previous study in the same cross-section, with similar meteorological conditions. Among the profiles and the equations for the reference concentration tested, Van Rijn's (1984) formulae performed best. However, in low velocities, close to the threshold for suspension, an underestimation of the concentrations was verified. An adaptation for the equations was made, which improved the results significantly. More tests, in a variety of conditions, are necessary to assess this adaptation, but the results presented looks promising. The volume of sediments estimated to be exported from the estuary in suspension, through this inlet, was in the order of $10^5 \text{ m}^3.\text{year}^{-1}$, according to the equations. The CTD data showed discrepancies regarding the equations and the current data. It's believed that the difference between the two is a consequence of a significant wash load verified in suspension. This concentration of fine sediments transported could have masked the turbidity response of sands in the area, reducing the efficiency of the sensor. If this is the case, then the turbidity sensor is not the best tool to assess suspended transport in the study site.

Notação

$U_{w_{cr}}$ – velocidade orbital crítica	C_a – concentração de referência
U_w – velocidade orbital	z_a – profundidade de referência
$\theta_{susp,cr}$ – parâmetro de <i>Shields</i> crítico para suspensão	ρ – densidade da água
θ – parâmetro de <i>Shields</i> total	ρ_s – densidade do grão (2650 kg.m ⁻³)
θ_c' – componente superficial do parâmetro de <i>Shields</i>	d_{50} – diâmetro mediano do grão
θ_c'' – componente de forma do parâmetro de <i>Shields</i>	s – razão de densidades (ρ_s/ρ)
u_* - velocidade de cisalhamento	g - gravidade (9.81 m.s ⁻²)
τ_{cr}' - Estresse crítico por correntes	D_* - diâmetro adimensional do grão
W_s – velocidade de decantação	T_s – excesso do estresse ($\tau' - \tau_{cr}/\tau_{cr}$)
Δ_s – altura das formas de fundo	κ – constante de von Karman (0,41)

1. Introdução

O transporte em suspensão é o modo predominante em rios, canais de maré e praias arenosas. O fator determinante para o transporte sedimentar nesta modalidade é a velocidade do fluxo, sendo que este transporte torna-se mais importante em altas velocidades (acima de 1 m.s⁻¹). Para que os grãos mantenham-se em suspensão, a turbulência gerada pelo fluxo deve ser maior que a velocidade de decantação (Soulsby, 1997). Desta forma, a granulometria é outro fator a ser considerado, principalmente em fluxos mais lentos que 1,4 m.s⁻¹ (Van Rijn, 2007).

No transporte em suspensão, uma carga significativa do material pode encontrar-se transportada por lavagem. Van Rijn (1993) caracteriza esse transporte como aquele em que os sedimentos menores que 50 μ m são mobilizados, e que não são encontrados em quantidades significativas no fundo.

Esta modalidade pode apresentar concentrações 2 a 3 vezes maiores que o transporte em suspensão em altas velocidades, atingindo de 5 a 20 vezes em velocidades baixas (Van Rijn, 2007).

No geral, um perfil vertical das concentrações de sedimentos em suspensão revela uma gradação entre o fundo e a superfície, com as maiores concentrações mais próximo ao fundo (Sternberg *et al.*, 1988). Por esta razão, diversas equações foram postuladas para descrever o seu comportamento na coluna d'água. A estimativa do transporte em suspensão depende também da Concentração e da Profundidade de Referência (C_a e z_a), que servem como uma estimativa de ordem zero para o cálculo do transporte em suspensão (Bolaños *et al.*, 2012).

Na desembocadura sul do Complexo Estuarino de Paranaguá, a presença de diversas unidades de conservação e do canal navegável dragado, acesso aos portos da região, demanda um conhecimento da dinâmica sedimentar deste sistema, de forma que o impacto das intervenções realizadas possa ser mensurado e mitigado de forma eficiente. Neste aspecto, o conhecimento dos padrões de transporte de sedimentos na desembocadura representa uma incógnita se considerado as relações entre erosão e deposição, assim como sua contribuição ao sistema costeiro.

Assim, o objetivo deste trabalho foi definir o melhor perfil de concentrações de sedimentos em suspensão na coluna d'água, assim como a melhor equação para o cálculo da Concentração e da Profundidade de Referência para o transporte em suspensão, na região da desembocadura sul do Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP), e estimar o volume de areias transportadas por esta modalidade.

1.1 Área de estudo

A área de estudo compreende a desembocadura sul do Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP), localizada na porção centro-norte do litoral paranaense (Fig. 2.1). Segundo Lana *et al.* (2001) o regime de maré na região é predominantemente semi-diurno, com amplitudes inferiores a 2 m. Além disso, as

marés possuem uma assimetria em sua duração, como descrito por Marone & Jamiyanna (1997), com a vazante (duração de 5,5 h) tendo uma duração menor que a enchente (6,8 h).

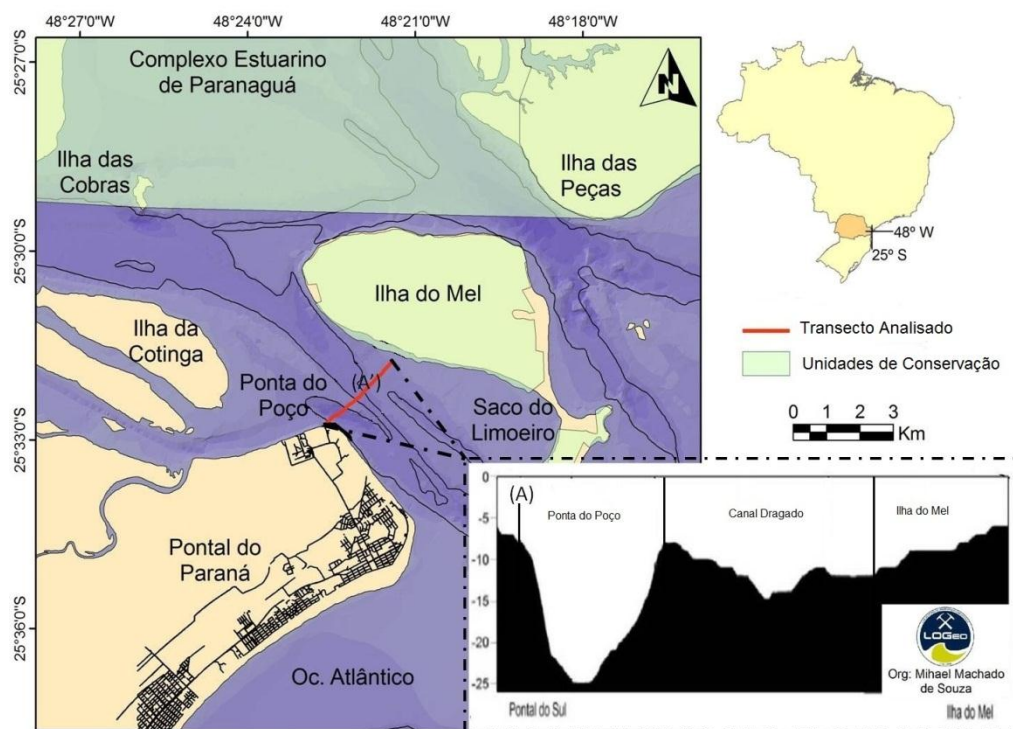


Figura 2.1 – Visão geral da desembocadura do Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP), com o detalhe da batimetria no transecto estudado no qual foram obtidas as amostras de transporte por carga de fundo e os dados de correntes.

Com relação ao padrão de circulação, Noernberg *et al* (2007) verificaram que as correntes de maré acompanham a via de navegação, com uma preponderância das correntes de vazante sobre as de enchente em toda a coluna d'água. Essa preponderância das correntes de vazante também é reportada por Lana *et al.* (2001) e Mantovanelli *et al.* (2004), este último indicando aumento de até 48% na intensidade média das correntes de vazante em relação às enchentes. Quanto à vazão do estuário, Marone *et al.* (2007) estimaram a magnitude da

vazão em $10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, tanto para a porção central do estuário, em frente ao porto de Paranaguá, quanto para a região da desembocadura sul.

Lana *et al.* (2001) reporta as ondas que adentram a desembocadura sul como preferencialmente provindas do quadrante SE, com altura significativa de 0,5 m, e períodos variando dos 3 aos 7 s. A altura significativa de onda pode chegar aos 2 a 3 m, em condições de tempestade. Noernberg *et al.* (2007) salientaram que as ondas possuem alto poder de ressuspensão (turbulência) e transporte de sedimentos, atuando principalmente no transporte por carga de fundo e promovendo o assoreamento do canal navegável.

O diâmetro médio dos sedimentos de fundo na região varia entre as areias finas a médias, enquanto que o grau de seleção varia entre bem a muito bem selecionados, com teores de carbonatos e matéria orgânica abaixo dos 5% e porcentagens de finos inferiores a 10% (Lamour *et al.*, 2004).

Noernberg (2001) verificou o alcance da pluma estuarina em, aproximadamente, 25 km além da desembocadura, denotando o transporte de sólidos em suspensão da área.

Machado *et al.* (1997) mensuraram a concentração do material particulado em suspensão (MPS), ao longo do segmento L-O do CEP durante um ano, entre $1,7 - 221 \text{ mg.l}^{-1}$. Especificamente na região da desembocadura sul, os valores estiveram entre 10 e 50 mg.l^{-1} , com as maiores concentrações mais próximo ao fundo, enquanto que Mantovanelli *et al.* (1999) mensuraram concentrações com valores entre $0 - 30 \text{ mg.l}^{-1}$, para a mesma área.

2. Materiais e Métodos

2.1 Séries de Dados

Os dados de correntes foram obtidos a partir de levantamentos realizados na região com o uso de um correntômetro acústico ADP-Sontek, no contexto do projeto de cooperação Brasil-Alemanha DESPORT (Marone *et al.*, em prep.), ao longo de uma seção transversal entre a Ponta do Poço e a Ilha do Mel (Fig. 2.1).

Foram realizadas medições a cada hora, durante dois ciclos semi-diurnos completos de sizígia (26 h) em Fevereiro de 2008.

Os dados relativos à altura significativa e período de ondas foram consultados de Lana *et al.* (2001), com o intuito de verificar a influência desta forçante na região, através do cálculo do limiar de transporte por ondas ($U_{w_{cr}}$).

Uma análise prévia dos dados de batimetria indicou a necessidade de uma divisão da seção transversal em três segmentos pela profundidade média, sendo denominados: Ponta do Poço (PP) – 24 m, Canal Dragado (CD) – 14 m, e Ilha do Mel (IM) – 8 m (Fig. 1A).

2.2 Dados de Campo

Os dados de perfilagem da coluna d'água foram obtidos com um Compact-CTD (JFE Advantech Co., Ltd.), com turbidímetro acoplado, durante um ciclo semi-diurno completo de maré de sizígia, a cada hora em cada estação. Também foram coletadas amostras de água em três profundidades diferentes (superfície, meio e fundo) a cada duas horas. Este trabalho foi realizado com uma garrafa coletora horizontal, mergulhada apenas na estação CD. Cada uma das amostras foi guardada em recipiente plástico de 1 L, e resfriadas para posterior análise em laboratório.

Essas amostras foram processadas segundo o método gravimétrico de Strickland & Parsons (1971), utilizando filtros GF-3 de fibra de vidro, previamente pesados. Os filtros foram secos em estufa por 2 horas, pesados em balança analítica com precisão de 10^{-5} e, depois, calcinados em mufla, a 450 °C, por 4 horas. Depois de calcinados e resfriados, os filtros foram novamente pesados, com o intuito da obtenção da concentração dos sólidos em suspensão.

Então, foi realizada uma regressão linear entre o valor em unidades nefelométricas (NTU) fornecido pelo turbidímetro e a concentração de sólidos em suspensão (kg.m^{-3}) para a calibração do CTD, com um $R^2 = 0,76$ (Fig. 2.2). Os valores do transporte (kg.m^{-3}) a partir dos dados do CTD na coluna d'água foram integrados para se obter uma concentração média.

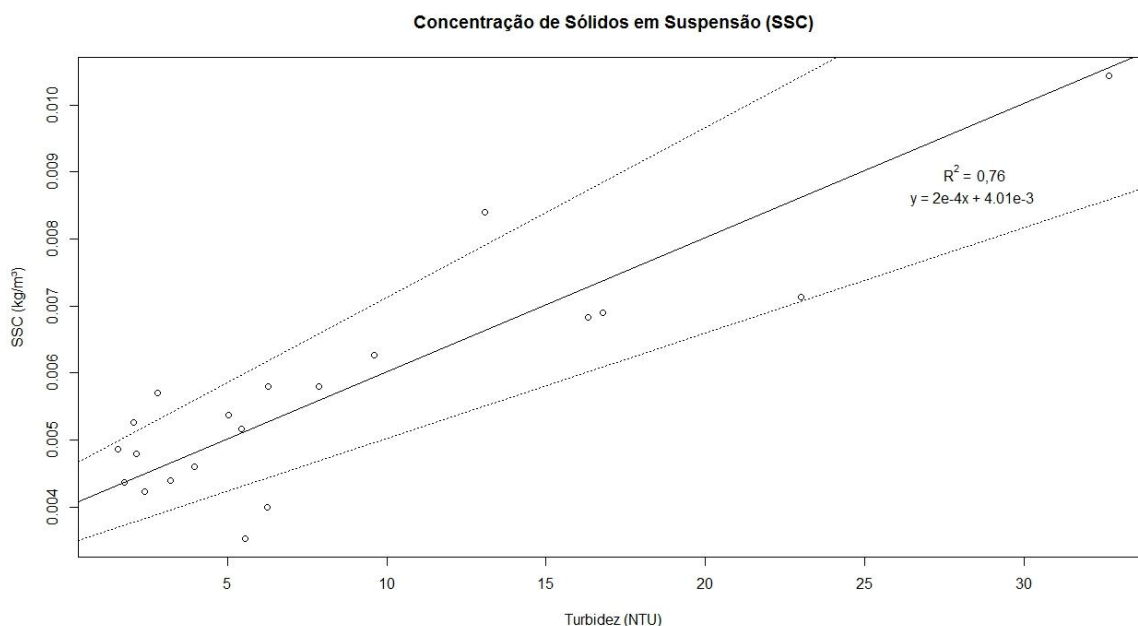


Figura 2.2 – Curva de calibração da turbidez (em NTU) a partir da concentração de sólidos em suspensão (kg.m^{-3}).

Além disso, foram obtidas amostras de sedimentos de fundo de cada estação, para verificação da sua compatibilidade com os dados pretéritos para a região. Em laboratório, as amostras foram secas em estufa e pesadas em balança analítica com precisão de 10^{-4} . As amostras de sedimentos de fundo foram processadas seguindo o mesmo método utilizado em Lamour *et al.* (2004) para preservar o potencial de comparação dos resultados. Esta comparação de dados serviu para verificar se houveram mudanças significativas nos sedimentos de fundo já relatado para a região, permitindo a utilização desses dados pretéritos para efetuar generalizações.

2.3 Definição do Melhor Formato do Perfil de Concentrações, da C_a e da z_a

Os perfis de concentração de sedimentos em suspensão (mg.l^{-1}) para a coluna d'água, obtidos com o turbidímetro, foram plotados utilizando a profundidade adimensional, de forma que as três regiões pudessem ser

comparadas.

Tanto as taxas obtidas em campo quanto as preditas foram padronizadas em kg.m^{-3} , conforme as unidades no Sistema Internacional (S.I.). As suas razões foram plotadas em relação à velocidade dos fluxos, para avaliar a porcentagem de valores contidos no intervalo de um fator entre 0,5 e 3, conforme descrito por Soulsby (1997) como uma faixa aceitável para o transporte de sedimentos por correntes de maré. Primeiro foram plotados os formatos dos perfis de concentração, para definir o que melhor representa a suspensão na coluna d'água, utilizando C_a e z_a como descrito por Van Rijn (1984) para a avaliação dos formatos.

Em seguida, com o perfil escolhido, foram plotadas as razões entre os valores de transporte obtidos a partir de cada C_a e z_a avaliados, em relação à velocidade das correntes.

2.4 Volume Transportado por Ciclo de Maré

Uma vez definido o formato do perfil de concentração de sedimentos em suspensão na coluna d'água e a C_a e a z_a a serem utilizados para a estimativa de ordem zero, a concentração em suspensão predita foi calculada para todo o momento em que haveria transporte ativo ($\theta_c > \theta_{\text{susp,cr}}$).

Utilizando-se a ordem de magnitude da vazão do estuário descrita por Marone *et al.* (2007), e as concentrações de sedimentos ao longo da coluna d'água preditas com as equações e obtidas com o CTD, foram calculadas as médias integradas do transporte em suspensão ao longo do ciclo de maré, em ambos os momentos (enchente e vazante), assim como o transporte residual (em $\text{kg.ciclo de maré}^{-1}$).

Para obter uma estimativa desta taxa como contribuição anual da desembocadura em volume, dividiu-se o valor pela densidade média do quartzo (2650 kg.m^3) e considerou-se um período de meio ano (marés de sizígia) com dois ciclos de maré diários.

3. Teoria

O limiar de transporte em suspensão ($\theta_{\text{susp,cr}}$) e o diâmetro médio em suspensão na coluna d'água foram calculados segundo as equações de Van Rijn (1993). O parâmetro de Shields a partir das correntes (θ_c) foi obtido pelo método descrito por Soulsby (1997), assim como a velocidade de decantação dos sedimentos (W_s).

Para o cálculo da Concentração de Referência (C_a), foi utilizada apenas a componente superficial do estresse (θ_c'), já que Soulsby (1997) descreve que é a ação das correntes sobre o grão que irão provocar o movimento, e gerar as concentrações de ordem zero. Porém, uma vez em suspensão, a difusão de sedimentos pela coluna d'água será uma função do estresse total ($\theta_c = \theta_c' + \theta_c''$). Dessa forma, o estresse gerado pela presença de feições de fundo (θ_c'') deve ser considerado para o estágio de transporte em suspensão (Soulsby, 1997; Bolaños *et al.*, 2012). Como não há informações precisas a respeito das dimensões das formas de fundo na região, as equações de Van Rijn (1993) foram utilizadas para a estimativa da altura e comprimento destas formas a partir das velocidades de corrente e da granulometria de fundo. Uma vez calculados os valores de estresse (θ_c), pressupõe-se que o transporte em suspensão ocorrerá quando este valor ultrapassar o limiar de suspensão ($\theta_{\text{susp,cr}}$).

Foram testados três formatos do perfil de concentrações de sedimentos em suspensão na coluna d'água, com o intuito de se verificar qual melhor se adequa aos dados de campo:

$$C(z) = C_a \left(\frac{z}{z_a} \right)^{-b} \text{ (Perfil Power-Law)}$$

$$C(z) = C_a \left[\frac{z}{z_a} \frac{h - z_a}{h - z} \right]^{-b} \text{ (Perfil de Rouse)}$$

$$C(z) = C_a \left[\frac{z}{z_a} \frac{h - z_a}{h - z} \right]^{-b} \text{ para } z_a < z < h/2 \text{ (Perfil de Van Rijn, 1984)}$$

$$C(z) = C_a \left(\frac{z_a}{h - z_a} \right)^{b'} \exp \left[-4b' \left(\frac{z}{h} - \frac{1}{2} \right) \right] \text{ para } h/2 < z < h$$

com: $b' = \frac{b}{B_1} + B_2$

$$B_1 = 1 + 2\left(\frac{W_s}{u_*}\right)^2 \text{ para } 0,1 < W_s/u_* < 1$$

$$B_1 = 2 \text{ para } W_s/u_* \geq 1$$

$$B_2 = 2,5\left(\frac{W_s}{u_*}\right)^{0,8}\left(\frac{C_a}{0,65}\right)^{0,4} \text{ para } 0,01 \leq W_s/u_* \leq 1$$

$$B_2 = 0 \text{ para } W_s > u_* \text{ ou } z_a > 0,1h$$

Para todas as equações, $b = \frac{W_s}{\kappa u_*}$, o que corresponde ao número de

Rouse.

Também foram testadas três fórmulas para o cálculo de C_a e z_a , sendo:

$$C_a = \frac{0,00156T_s}{1 + 0,0024T_s}$$

$$z_a = \frac{26,3\tau_{cr}T_s}{\rho g(s-1)} + \frac{d_{50}}{12} \text{ (Smith \& McLean, 1977; SM)}$$

$$C_a = \frac{0,015d_{50}T_s^{3/2}}{z_a D_*^{0,3}}$$

$$z_a = \frac{\Delta_s}{2}, \text{ valor mínimo de } z_a = 0,01h \text{ (Van Rijn, 1984; VR)}$$

$$C_a = A\left(\theta' \frac{u_*'}{W_s}\right)^B \text{ (Lee et al., 2007; LE)}$$

onde: $A = 2,58 \pm 1,7$

$$B = 1,45 \pm 0,04$$

$$z_a = 0,01 \text{ m.}$$

Dentre as três fórmulas, a única que não apresenta uma equação para z_a é LE, a qual utiliza um valor fixo de 0,01 m. Os volumes em suspensão foram integrados na coluna d'água e representados pelo valor médio, em kg.m^{-3} , para comparação posterior com os dados de campo.

4. Resultados

4.1 Série de Dados

A análise da curva de maré para o período de 2008, quando os dados de correntes foram obtidos, e a curva de maré de 2012, quando os dados de transporte foram coletados, demonstra amplitudes e comportamento muito similares (Fig. 2.3) entre os momentos. Porém, a amplitude da maré em 2008 foi um pouco superior à amplitude em 2012 (cerca de 0,2 m), o que pode indicar correntes de maré um pouco mais intensas neste período. Para cada seção foi calculada a velocidade média das correntes ao longo do ciclo de maré, obtendo-se valores de até $0,9 \text{ m.s}^{-1}$.

Quanto às amostras de sedimentos de fundo, verificou-se que todas estão em acordo com os resultados obtidos por Lamour *et al.* (2004), o que nos permite extrapolar os resultados obtidos neste trabalho como válidos para toda a região da desembocadura, onde a predominância de areias finas foi identificada por estes autores.

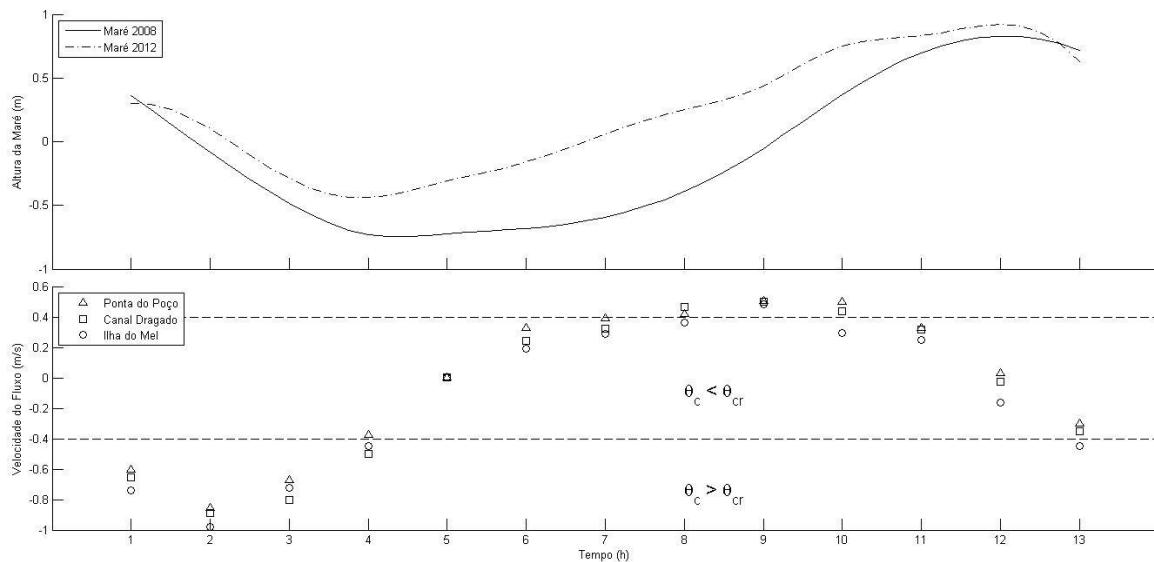


Figura 2.3 – Curvas das marés de 2008 e 2012, mostrando uma variação efetiva

na amplitude de 0,2 m (acima). Abaixo, gráfico com a velocidade do fluxo ao longo do ciclo de maré (em m.s^{-1}), com a faixa de transporte nulo.

Quanto ao $U_{w_{cr}}$ calculado para a região, o valor aproximado para as três estações foi de $0,14 \text{ m.s}^{-1}$ ($\pm 7 \times 10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$). A velocidade orbital (U_w) calculada para as três estações excedeu este limiar apenas na IM, apresentando valor de $0,15 \text{ m.s}^{-1}$, uma ordem de magnitude acima dos demais compartimentos. Estes valores demonstraram que o potencial de transporte das ondas na região é pequeno. Porém, em condições de tempestade, nas quais se espera que as alturas de ondas sejam maiores, é provável que haja uma maior influência deste parâmetro.

4.2 Definição do Melhor Formato do Perfil de Concentrações, da C_a e da z_a

Analisando o perfil vertical de concentrações, e sua evolução ao longo do ciclo de maré em cada estação (Fig. 2.4), vê-se que houve uma constância de concentrações na casa dos 4 a 8 mg.l^{-1} ao longo do ciclo. Os picos de concentrações, de até 30 mg.l^{-1} , ocorreram em momentos específicos do ciclo de maré, e sempre nos últimos 20 a 40% da coluna d'água (próximo ao fundo). A exceção foi a estação Ilha do Mel, no qual a suspensão mostrou-se quase homogênea ao longo da coluna d'água nos momentos mais intensos da maré. Esses momentos de maiores concentrações coincidem com a redução das velocidades abaixo do limiar de transporte em suspensão, indicando que esses picos de concentração podem estar associados com a deposição de material sedimentar a partir da coluna d'água.

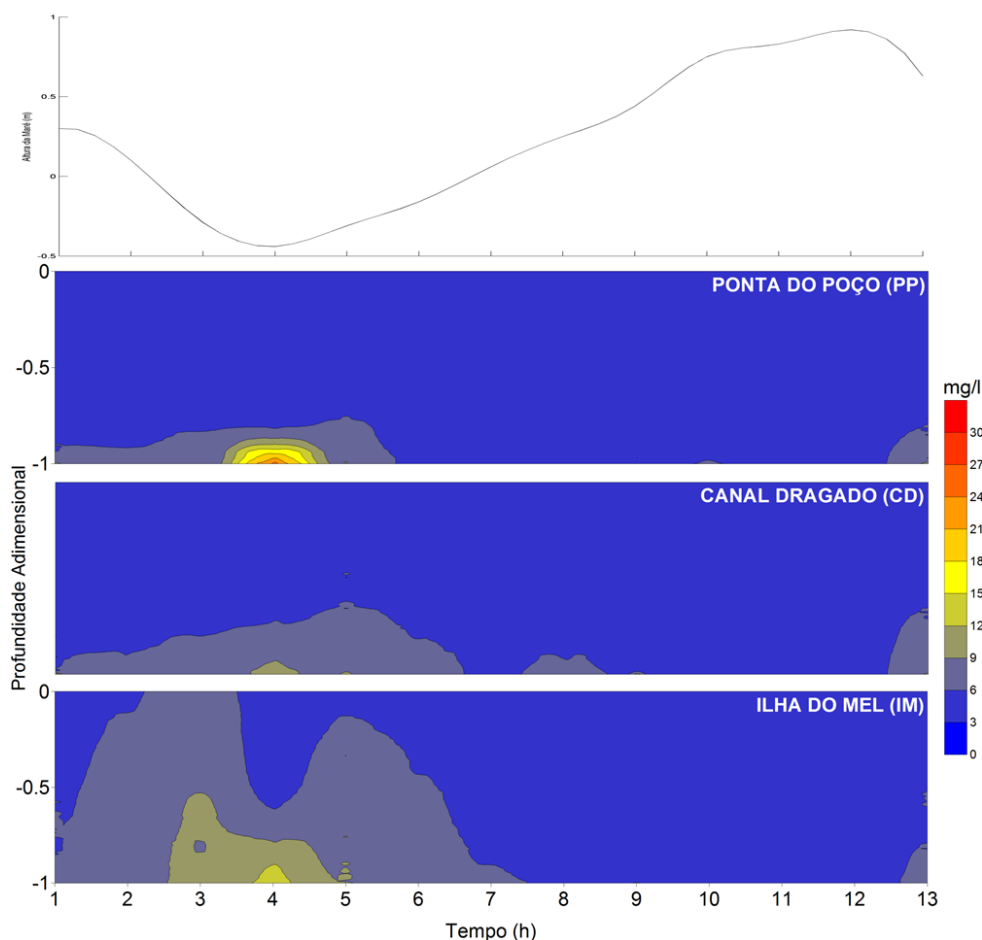


Figura 2.4 – Perfil vertical de concentrações (em mg.l^{-1}) ao longo do ciclo de maré interpolados a partir dos perfis verticais com o CTD, utilizando a profundidade adimensional para a comparação das estações.

Em relação ao formato dos perfis de concentração para as areias em suspensão avaliados, tanto um perfil em *Power Law* quanto o perfil de Van Rijn (1984) apresentaram um mesmo comportamento, com 33 % dos dados caindo na faixa aceitável de 0,5 a 3 (Fig. 2.5). Porém o perfil de Van Rijn apresenta dados mais próximos do limite desejado que o perfil *Power Law*, além de uma base física mais robusta, sendo o mais indicado neste trabalho.

Com o formato do perfil de concentrações na coluna d'água escolhido, foram plotadas as razões entre as taxas obtidas pela aplicação das diferentes fórmulas para C_a e z_a (Fig. 2.6). No geral, a fórmula de VR foi a que melhor se

adequou aos dados obtidos em campo. As equações de LE e de SM superestimaram os dados do CTD, com valores variáveis.

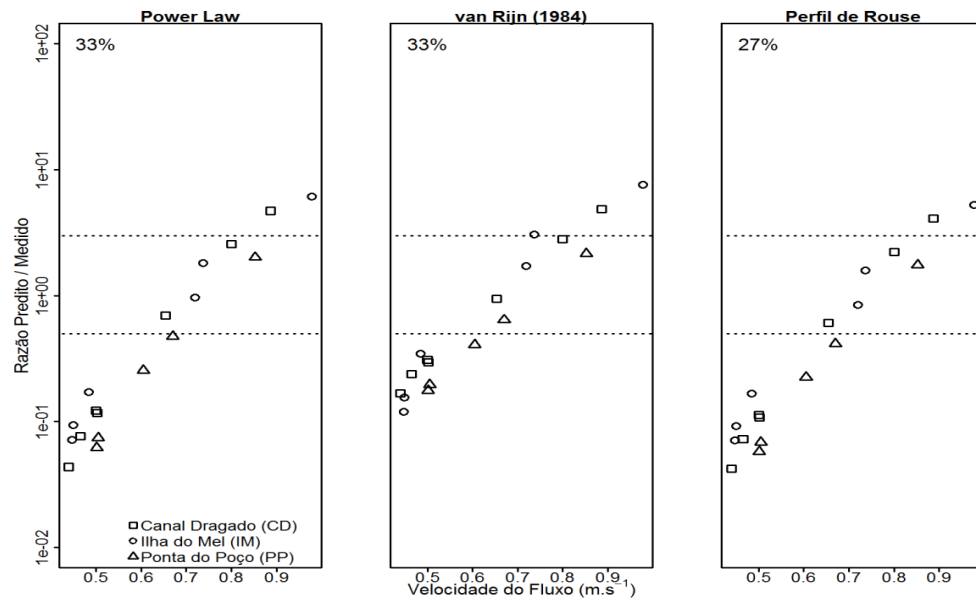


Figura 2.5 – Razão entre taxas previstas e mensuradas usando os diferentes perfis de concentração avaliados, utilizando como base o cálculo da concentração e profundidade de referência segundo Van Rijn (1984).

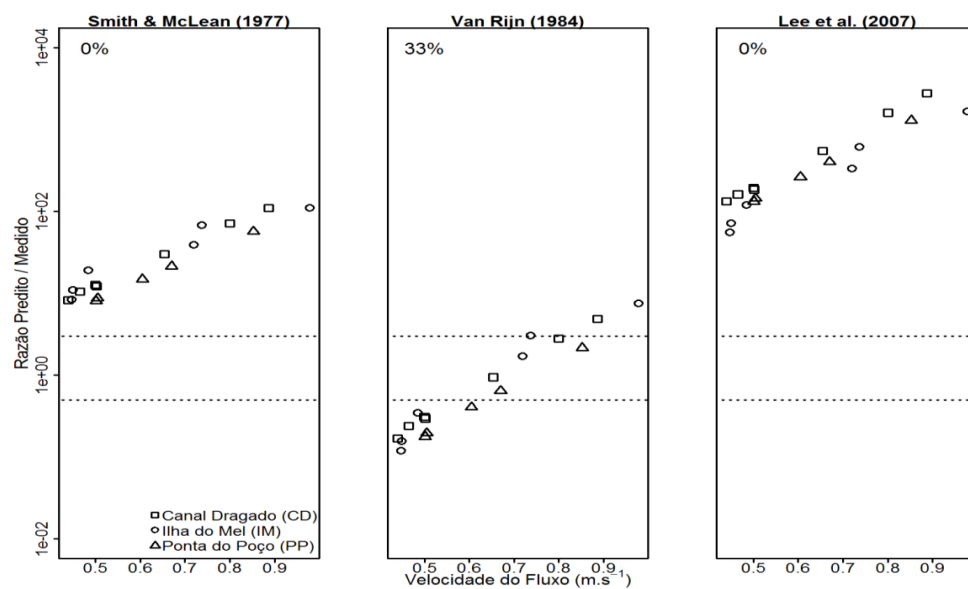


Figura 2.6 – Razões entre as taxas previstas e mensuradas utilizando as

diferentes fórmulas de concentração e profundidade de referência. Perfil de concentrações na coluna d'água utilizado foi o de Van Rijn (1984).

Em baixas velocidades (menor que $0,7 \text{ m.s}^{-1}$), a equação de VR subestimou sistematicamente o transporte. Dessa forma, sugerimos o uso de uma profundidade de referência fixa em $0,01 \text{ m}$ para velocidades abaixo de $0,7 \text{ m.s}^{-1}$, e a equação proposta pelo autor acima desta velocidade. Esta adaptação parece ter melhorado seu desempenho diante das condições avaliadas (Fig. 2.7), o que pode indicar que a interface carga de fundo-suspensão encontra-se próxima ao fundo no limiar de suspensão, intensificando este transporte em baixas velocidades.

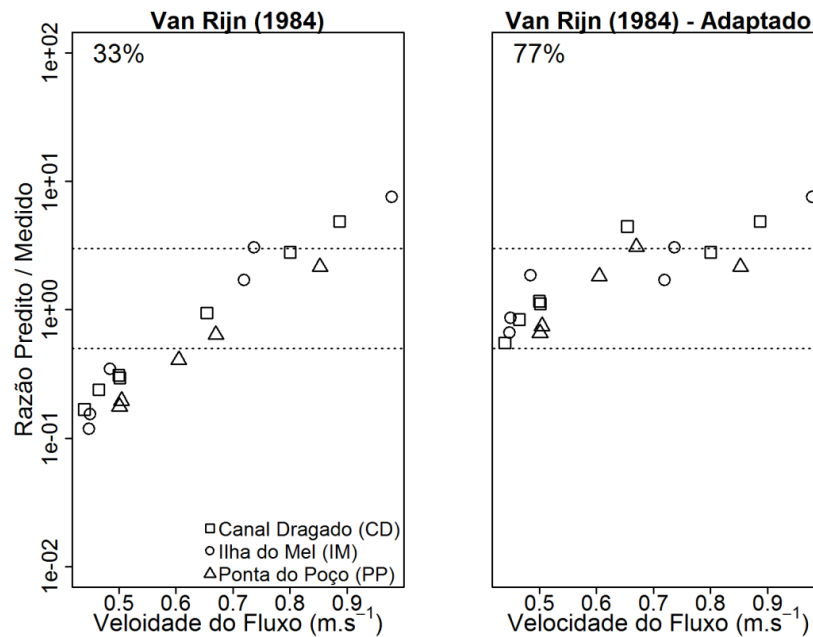


Figura 2.7 – Razões entre as taxas previstas e mensuradas utilizando as fórmulas de Van Rijn (1984) e Van Rijn (1984) Modificado, para as concentrações e profundidade de referência.

4.3 Volume Transportado por Ciclo de Maré

A partir das taxas previstas com a equação de VR adaptada, foram obtidas as taxas de areias transportadas em suspensão ao longo do ciclo de maré (Fig.

2.8). De modo geral, as concentrações foram maiores na maré vazante que na enchente, com uma concentração residual exportada de, aproximadamente, 2×10^6 kg.ciclo de maré⁻¹. Já utilizando as médias calculadas a partir dos dados do CTD (Fig. 2.9), vemos uma predominância das marés enchente em relação às vazantes, com uma concentração residual importada para o estuário de aproximadamente 2×10^6 kg.ciclo de maré⁻¹. Se compararmos os resultados para a média da seção entre o medido com o CTD e o calculado, verifica-se que essa razão para a vazante é 0,48; para a enchente é de 9,8; e para o residual, é de 1,07. Em ambos os casos, foi considerada a vazão do estuário como 10^4 m³.s⁻¹, como sugerido por Marone *et al.* (2007).

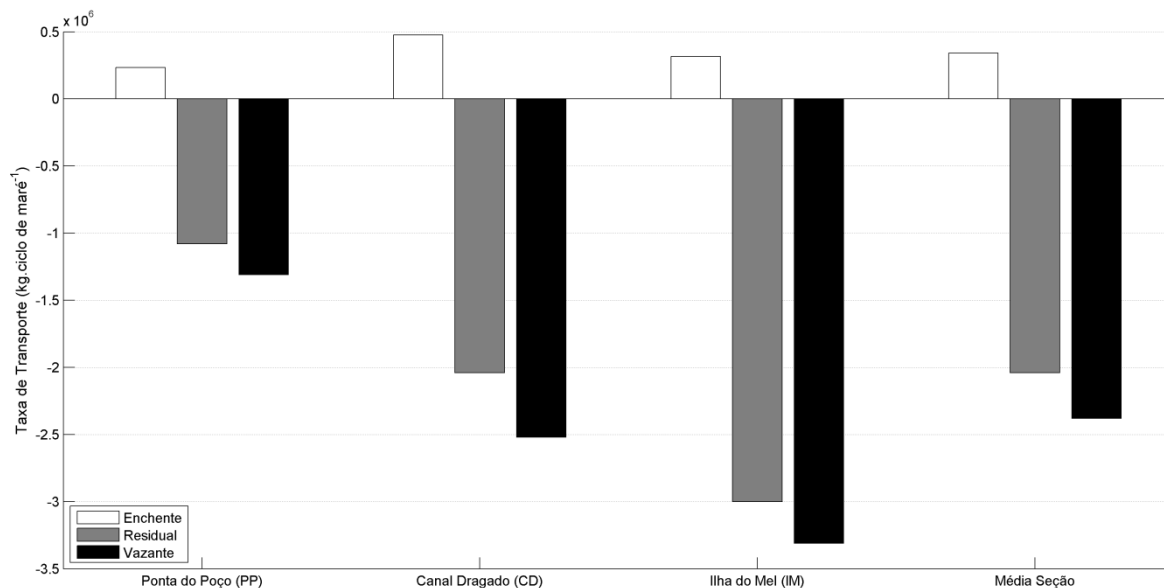


Figura 2.8 – Quantidade de sedimentos transportados (kg.Ciclo de Maré⁻¹) calculada a partir do perfil de Van Rijn de concentrações para a coluna d'água, e da concentração e profundidade de referência sugeridas pelo mesmo autor com a modificação sugerida neste trabalho.

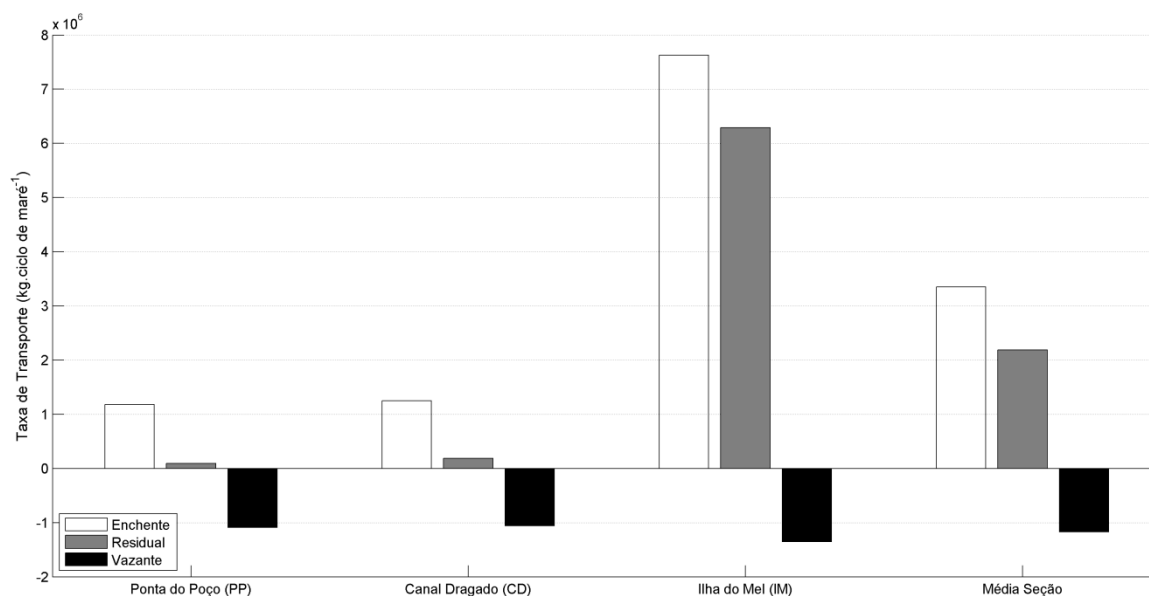


Figura 2.9 – Quantidade de sedimentos transportados ($\text{kg.Ciclo de Maré}^{-1}$) a partir do valor médio do transporte na coluna d'água obtido a partir dos perfis com CTD.

A partir das considerações para a contribuição anual, a exportação de material por suspensão seria da ordem de $10^5 \text{ m}^3.\text{ano}^{-1}$. A partir dos dados do CTD obtêm-se uma mesma ordem de magnitude, porém com sentido oposto (importação de material pelo estuário).

5. Discussão

5.1 Definição do Melhor Formato do Perfil de Concentrações, da C_a e da z_a

Os valores obtidos com o CTD (Fig. 2.4) estão um pouco abaixo dos valores encontrados por Machado *et al.* (1997), mas se encontram de acordo com os valores obtidos por Mantovanelli *et al.* (1999). Vale salientar que estes trabalhos mensuraram a concentração de MPS na coluna d'água, enquanto este trabalho avaliou a concentração dos sólidos em suspensão (CSS). Assim, é de se esperar que a CSS seja menor que o MPS, pois os componentes orgânicos são uma parte importante deste material.

Além disso, vemos que há a predominância de uma concentração de material entre 4 e 8 mg.l⁻¹ que independe do estágio da maré e da velocidade das correntes. Este material apresenta uma suspensão uniforme na coluna d'água que, de acordo com Van Rijn (2007), pode ser entendido como um transporte por lavagem. Desta forma, este material deve ser predominantemente fino, e não encontrado em quantidade no sedimento de fundo (Van Rijn, 1993).

Como na região há areias finas, muito bem a bem selecionadas (Lamour *et al.*, 2004), a presença de sedimentos finos no sedimento de fundo é muito pequena, e o transporte em suspensão seria, predominantemente, de areias. Provavelmente, estes sedimentos finos provem diretamente do interior do estuário, e são transportados para a plataforma continental sem se depositar na região, compondo a pluma de sedimentos analisada por Noernberg (2001).

Os perfis de concentração testados avaliam, basicamente, o formato da curva de concentração de sedimentos em suspensão ao longo da coluna d'água. O perfil de Rouse e o de Van Rijn (1984) apresentam um comportamento parabólico ao longo da coluna d'água, enquanto a *Power Law* apresenta um comportamento linear (Soulsby, 1997). A principal diferença entre o perfil de Rouse e os demais é que ele possui valor zero na superfície, fato incomum de se encontrar em condições marinhas. Bolaños *et al.* (2012) testaram tanto o perfil de Rouse quanto o *Power Law* em seus dados, chegando a conclusão que o *Power Law* representa melhor a distribuição da concentração de sedimentos em suspensão. Sternberg *et al.* (1988), utilizando o perfil de Rouse, obteve 50% de correlação entre dados teóricos e mensurados em campo. Soulsby (1997) salienta que o uso do perfil de Rouse no mar não é adequado, devido à sua redução a zero junto à superfície. O mesmo autor salienta que o perfil de Van Rijn (1984) é mais indicado, pois utiliza o comportamento parabólico do perfil de Rouse, sem a redução a zero.

Neste trabalho, ambos o perfil de Van Rijn (1984) quanto o *Power Law* apresentaram o melhor desempenho dentre os avaliados, corroborando a avaliação de Soulsby (1997) e Bolaños *et al.* (2012) quanto a indicação destes formatos do perfil de concentrações. Além disso, como para a área de estudo a

suspensão encontra-se limitada ao último terço da coluna d'água, o desempenho desses formatos não pôde ser bem avaliado, já que segundo Soulsby (1997) eles se igualam no último quarto da coluna d'água. Sugere-se o uso do perfil de Van Rijn (1984), pois este apresenta maior robustez física que o *Power Law*. A simplicidade matemática do perfil *Power Law* pode ser uma vantagem em casos em que se deseja reduzir o esforço computacional, desde que o aspecto físico pode ser desconsiderado.

Dentre as três fórmulas para o cálculo da C_a e z_a , apenas VR apresentou uma porcentagem de dados dentro da faixa desejada. Bolaños *et al.* (2012) ao utilizarem a fórmula de LE obtiveram os melhores resultados na comparação entre dados teóricos e mensurados. Porém, esta equação foi elaborada em regiões onde a ação de ondas era significativa, o que naturalmente eleva os valores das concentrações em suspensão através de um incremento no estresse (Soulsby, 1997). Como na área de estudo deste trabalho a presença de ondas não é efetiva, isso pode explicar porque os valores obtidos a partir desta equação foram maiores que os medidos em campo, já que suas constantes foram calibradas para condições de fluxos combinados (correntes + ondas).

Soulsby (1997) apresenta as fórmulas de VR e SM como as melhores na representação desses valores de referência para o transporte em suspensão. Dentre elas, a que melhor representou os dados obtidos foi a de VR. Porém, para velocidades baixas, a equação tendeu a fornecer valores menores que os encontrados em campo. Este comportamento da equação já havia sido descrito por Van Rijn (1984; 1993; 2007) para velocidades abaixo de 0,7 m/s, o que coincide com a faixa subestimada pela equação neste trabalho.

Independente da fórmula escolhida, nenhuma delas apresentou um bom resultado em relação aos dados obtidos em campo. A principal diferença entre as três formulações, aparentemente, encontra-se na definição da profundidade de referência. O mínimo aceito pela equação de VR é de 1% da profundidade, enquanto para as duas outras equações, é de 0,01 m. Este valor seria referente a pequenas ondulações (*ripples*) formadas em condições de fluxos menos intensas, que geram pouca alteração na estrutura das correntes. Se considerarmos o

mesmo valor mínimo utilizado nas outras equações, para a equação de VR, temos uma melhora de até 50% no desempenho desta fórmula para baixas velocidades.

Como, para a região, velocidades abaixo dos $0,7 \text{ m.s}^{-1}$ são comuns ao longo do ciclo de maré, o uso de uma profundidade de referência fixa em 0,01 m para este intervalo parece ter melhorado significativamente o desempenho da equação de VR para a concentração de referência e, conseqüentemente, para o cálculo das taxas transportadas em suspensão. O uso desta profundidade mínima, inclusive, coincide com a profundidade de referência para o transporte da equação de Van Rijn (2007), e representa a concentração de referência sendo calculada na interface carga de fundo – suspensão. Devido ao baixo número de amostras de taxas de transporte em suspensão utilizada neste trabalho, esta adaptação requer um estudo mais abrangente para testar sua eficiência, principalmente diante de um quadro mais amplo de condições.

5.2 Volume Transportado por Ciclo de Maré

Como esperado, a partir da predominância das correntes de vazante sobre as de enchente descrita por diversos autores para a região (Lana *et al.*, 2001; Mantovanelli *et al.*, 2004; Noernberg *et al.*, 2007), a concentração residual calculada a partir da fórmula de VR foi estuário afora, com uma magnitude de $10^6 \text{ kg.ciclo de maré}^{-1}$. Desta forma, pode-se estimar o transporte em suspensão das areias em $10^5 \text{ m}^3.\text{ano}^{-1}$, segundo o calculado pela fórmula de Van Rijn (1984). Ressalta-se que este valor deve ser encarado apenas como uma estimativa da capacidade de transporte por suspensão deste sistema.

Allen & Castaing (1973) reportam concentrações em suspensão no estuário de Gironde (França) entre 100 e 500 mg.l^{-1} , com uma exportação de material pelo estuário em torno de 10^9 ton.m^{-1} . Estes autores estudaram um ambiente de macro-marés, mais energético que a área de estudo em questão, e obtiveram concentrações muito mais elevadas que as encontradas por este trabalho. Amos *et al.* (2010) e Villatoro *et al.* (2010) reportam a exportação de sedimentos da Laguna de Veneza, como um todo, na ordem de $10^6 \text{ m}^3.\text{ano}^{-1}$, com concentrações

em suspensão de até 10^3 mg.l^{-1} durante o ciclo de maré. A região possui contexto semelhantes (granulométrico, batimétrico e dinâmico) ao encontrado neste estudo. Diante deste quadro, a exportação sugerida neste trabalho parece coerente com a literatura.

Já a concentração residual calculada a partir dos dados de CTD teve uma mesma magnitude, porém sentido oposto (estuário adentro). De forma geral, o CTD mede a turbidez presente na coluna d'água a partir da reflexão do sinal infravermelho. Mantovanelli *et al.* (1999) realizaram um estudo do comportamento do sensor de turbidez a mudanças no diâmetro médio. Eles concluíram que o sensor apresenta uma resposta 54% maior para a presença de sedimentos finos em relação às areias, e que a diferença entre a resposta para sedimentos finos e areias é maior quanto menor a concentração do material na coluna d'água.

Além disso, Ludwig & Hanes (1990) salientam que a presença de partículas finas pode mascarar a resposta do turbidímetro, reduzindo sua eficiência para areias. Dessa forma, pode-se supor que a carga transportada por lavagem estaria mascarando a resposta da concentração de areias em suspensão. Se considerarmos apenas os momentos de enchente, quando o transporte de areias é bem menos efetivo, vemos que a razão mensurado/calculado é aproximadamente 10. Este valor está de acordo com o descrito por Van Rijn (2007) para a relação entre a suspensão e o transporte por lavagem em baixas velocidades. Ainda, a constância destes valores ao longo do tempo em toda a coluna d'água, associada a uma duração das marés enchentes (Marone & Jamiyanaa, 1997) maior que as vazantes, pode ter sido a responsável por fazer com que a média das concentrações fosse maior no sentido estuário adentro.

Como não foi possível separar a resposta do turbidímetro em relação à granulometria presente em suspensão na coluna d'água, no momento da coleta de dados com o CTD, a resposta em relação ao transporte por areias não pôde ser confirmada. O fato do transporte calculado pelas fórmulas ter sido maior que o obtido com o turbidímetro pode ser uma consequência do mascaramento das concentrações de areia em suspensão em função dos sedimentos finos, como descrito por Ludwig & Hanes (1990), ou um reflexo de uma diferença nas

velocidades dos fluxos entre os momentos de 2008 e 2012 devido à diferença na amplitude das marés. Porém, a proximidade dos dados obtidos com as fórmulas em relação ao obtido com o CTD para a vazante (razão de 0,5), momento no qual espera-se que o transporte por areias seja mais efetivo pela maior velocidade dos fluxos, permite supor que a avaliação das fórmulas realizada se mostre coerente.

6. Conclusão

Dentre todos os perfis testados, o de Van Rijn (1984) foi o que apresentou melhor correlação com os dados obtidos e, portanto, é o mais indicado. Porém, caso uma maior facilidade matemática seja desejada, o perfil através da *Power Law* pode ser utilizado, sem uma perda significativa na resposta das concentrações transportadas.

A fórmula para o cálculo da concentração e profundidade de referência descrita por Van Rijn (1984; 1993) mostrou fornecer os resultados mais coerentes com o encontrado em campo. Para baixas velocidades ($< 0,7 \text{ m.s}^{-1}$), o uso de uma profundidade de referência fixa em 0,01 m parece ter melhorado o desempenho das estimativas, apesar de que um teste com um maior conjunto de dados, numa gama maior de condições, ser indicado.

Foi verificada a presença de um transporte por lavagem na região, com concentrações entre 4 e 8 mg.l^{-1} . Essa concentração parece ter afetado a resposta do turbidímetro acoplado ao CTD quanto à concentração de areias em suspensão. Dessa forma, o turbidímetro não parece o equipamento mais indicado para avaliar o transporte em suspensão na região, sendo talvez preferível utilizar armadilhas.

Por fim, pôde-se estimar o transporte residual em suspensão na região numa ordem de $10^5 \text{ m}^3.\text{ano}^{-1}$. Este valor deve ser tratado com cautela, mas demonstra a capacidade de transporte do sistema.

Referências

Allen, G. P.; Castaing, P. 1973. Suspended sediment transport from the Gironde

estuary (France) onto the adjacent continental shelf. *Marine Geology*. 14, 47-53.

Bolaños, R.; Thorne, P. D.; Wolf, J. 2012. Comparison of measurements and models of bed stress, bedforms and suspended sediments under combined currents and waves. *Coastal Engineering*. 62, 19-30.

Lamour, M. R.; Soares, C. R.; Carrilho, J. C. 2004. Mapas dos parâmetros texturais dos sedimentos de fundo do Complexo Estuarino de Paranaguá – PR. *Boletim Paranaense de Geociências*. 55, 77-82.

Lana, P. C.; Marone, E.; Lopes, R. M.; Machado, E. C. 2001. The subtropical Estuarine Complex of Paranaguá Bay, Brazil, in: U. Seeliger & B. Kjerfve (Eds.) *Coastal Marine Ecosystems of Latin America*. Ecological Studies. 144, 131-145.

Lee, G.; Dade, W. B.; Friedrichs, C. T.; Vincent, C. E. 2004. Examination of reference concentration under waves and currents on the inner shelf. *Journal of Geophysical Research*. 89, 616-626.

Ludwig, K. A.; Hanes, D. M. 1990. A laboratory evaluation of optical backscatterance suspended solids sensors exposed to sand-mud mixtures. *Marine Geology*. 1-2, 173-179.

Machado, E. C.; Daniel, C. B.; Brandini, N.; Queiroz, R. L. V. 1997. Temporal and spatial dynamics of nutrientes and particulate suspended matter in Paranaguá Bay, PR, Brazil. *Nerítica*. 11, 15-34.

Mantovanelli, A.; Noernberg, M. A.; Marone, E.; da Silva, E. T. 1999. Avaliação da resposta do sensor de turbidez em diferentes concentrações e tamanhos de sedimento e comparação com medições no ambiente. *Boletim Paranaense de Geociências*. 47, 101-109.

Marone, E.; Jamiyanaa, D. 1997. Tidal characteristics and a numerical model for the M2 tide at the Estuarine Complex of the Bay of Paranaguá, Paraná, Brazil. *Nerítica*. 11, 95-107.

Noernberg, M. A.; Marone, E.; Angulo, R. J. 2007. Coastal currents and sediment transport in Paranagua Estuary Complex navigation channel. *Boletim Parananense de Geociências*. 60-61, 45-54.

Noernberg, M. A. 2001. Processos morfodinâmicos no Complexo Estuarino de Paranaguá – Paraná – Brasil: um estudo a partir de dados *in situ* e Landsat-TM. Tese. Universidade Federal do Paraná. 142 p.

Soulsby, R. 1997. Dynamics of marine sands: a manual for practical applications. Thomas Telford Publications, Londres, 249 p.

Sternberg, R. W.; Kranck, K.; Cacchione, D. A.; Drake, D. E. 1988. Suspended sediment transport under estuarine tidal channel conditions. *Sedimentary Geology*. 57, 257-272.

Strickland, J. L. H.; Parsons, T. R. 1968. A practical handbook of seawater analysis. *Bull. Fish Res. Board Can.*, 167, 341 p.

Van Rijn, L. C. 1984. Sediment transport part II: Suspended load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*. 110, 1613-1641.

Van Rijn, L. C. 1993. Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas. Aqua Publications, The Netherlands. 690 p.

Van Rijn, L. C. 2007. Unified view of sediment transport by currents and waves. II: Suspended transport. *Journal of Hydraulic Engineering*. 133, 668-689.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi avaliado o transporte de sedimentos a partir das correntes de marés, na desembocadura sul do Complexo Estuarino de Paranaguá. Para tanto, foram estimadas as duas principais formas de transporte de sedimentos arenosos: carga de fundo e suspensão.

De modo geral, o estuário, através da desembocadura sul, exporta material para a plataforma continental adjacente. O transporte em suspensão demonstrou ser mais importante que a carga de fundo para a região, devido aos maiores volumes quantificados, estando uma ordem de magnitude acima. Dessa forma, do ponto de vista da dinâmica sedimentar desta porção do sistema, o transporte em suspensão pode ser considerado o processo predominante de transporte de material.

Do ponto de vista das três estações avaliadas ao longo da seção transversal, a Ilha do Mel foi a que apresentou a maior dinâmica, refletida tanto nas maiores velocidades de fluxo quanto na maior suspensão e transporte de material. Além disso, esta é a única porção da seção onde a ação de ondas pode exercer uma influência efetiva no transporte de sedimentos. Do ponto de vista batimétrico, pode-se supor então que apenas as porções mais rasas da desembocadura (≈ 8 m) sofreriam a influência de ondas, quando consideramos os dados publicados em Lana *et al.* (2001). Essa avaliação deve ser tratada com cautela, devido ao recobrimento temporal restrito da avaliação de ondas. Por outro lado, a estação do Canal Navegável se mostrou uma região característica para avaliar a média das condições na área de estudo. Dessa forma, esta estação pode ser utilizada como representativa para uma avaliação do transporte de sedimentos na região, de forma estimada e sucinta, sem a necessidade de avaliar várias verticais ao longo da seção.

Apesar do transporte em suspensão ser o mais efetivo, é de se esperar que ele acabe transportando os materiais a maiores distâncias que o transporte por carga de fundo. Dessa forma, o assoreamento de regiões críticas do canal navegável, na região da desembocadura, provavelmente está mais associado ao

transporte por carga de fundo que a suspensão. O argumento de Gomez (1991) de que a carga de fundo é o processo responsável pelo assoreamento de canais suporta essa consideração. Por esta razão, o estudo do transporte por carga de fundo na região também é muito importante, e pode auxiliar em um melhor planejamento de futuras dragagens do canal.

Devido às limitações deste estudo, não foi possível avaliar o transporte em diferentes momentos do ano, nem avaliar as taxas transportadas em relação a velocidades de fluxo mensuradas concomitantemente. Essas limitações inserem alguns erros nas medições, e impedem uma avaliação mais precisa dos processos de transporte de sedimentos na região. Portanto, estima-se que o Complexo Estuarino de Paranaguá, através da sua desembocadura sul, exporte uma quantidade de sedimentos arenosos na ordem de $10^5 \text{ m}^3.\text{ano}^{-1}$, considerando ambos os processos de carga de fundo e suspensão. Esta estimativa nos permite, ao menos, comparar o sistema em estudo com outros sistemas no mundo, e avaliar a quantidade de material disponibilizada para a plataforma continental interna e costa adjacente através desta desembocadura.

Por fim, foi verificada a presença de uma carga de sedimentos muito finos na região, sendo transportados por lavagem segundo a classificação de Van Rijn (1993). Esses sedimentos não chegam a se depositar na região de estudo, visto que não foram encontradas porcentagens significativas de lamas nos sedimentos de fundo. Este material pode acabar mascarando a resposta do sensor de turbidez para as concentrações de areias em suspensão, como descrito por vários autores (Mantovanelli *et al.*, 1999; Ludwig & Hanes, 1990). Dessa forma, sugere-se que a avaliação do transporte em suspensão na região seja feita com o uso de armadilhas físicas, evitando esta problemática. Ainda, novos estudos, com maior recobrimento temporal e coleta concomitante de dados de correntes, podem permitir uma avaliação precisa do transporte de sedimentos na desembocadura sul do Complexo Estuarino de Paranaguá, e auxiliar nos estudos de dinâmica da região.